

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
В РАЙОНЕ ВИСЛИНСКОГО ЗАЛИВА ДО 2080 г.

Е.Е. Есюкова, Б.В. Чубаренко, Л.В. Лейцина

*Атлантическое отделение Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН,*

*Лаборатория прибрежных систем*

В работе проведён анализ возможного (вплоть до 2080 г.) изменения среднеклиматических величин (для стандартных климатических периодов – 30 лет) температуры воздуха, атмосферных осадков и давления, облачности, влажности и ветра для района Вислинского залива. Оценки сделаны на основании результатов (для района Юго-восточной Балтики) численного расчёта, проведенного в проекте ECOSUPPORT на модели RCOA-hadcm3ref-a1b-25km (1957-2099 гг.). Обсуждаются изменения величин метеопараметров для точек, расположенных в море и на суше – вблизи Вислинского залива. Ожидается рост среднегодовых значений температуры со скоростью  $\sim 1^\circ\text{C}$  за 30-летний период. Осадки, относительная влажность, облачность, а так же средние величины давления, имеют устойчивые положительные тренды.

### Введение

В настоящее время продолжается работа по формулировке наиболее вероятных сценариев климатических изменений для региона Балтийского моря. В научной литературе озвучен подход к их разработке, к возможной оценке диапазона ожидаемых последствий в терминах изменений основных метеорологических и гидрофизических параметров /25, 26/.

Методически, оценка последствий изменения климата в региональном масштабе включает использование глобальных совместных моделей циркуляции океана-атмосферы, которые обеспечивают граничные условия для региональных моделей более высокого разрешения. Последовательность шагов для получения предсказания климатических изменений на региональном уровне выглядит следующим образом:

а) задается сценарий эмиссии (на основе /2/).

б) настраивается «глобальная» циркуляционная модель атмосферы - глобальная связанная атмосфера-океан генеральная циркуляционная модель для всего Земного шара с разрешением сотни километров по горизонтали (например, МОЦА ГГО, ECHAM), с 10-20 вертикальными слоями в атмосфере, до 30 слоев в океане. Выбирается контрольный и прогнозируемый периоды, проводятся расчеты по выбранному сценарию эмиссии /3/, /4/, /5/, /6/, /7/, /8/, /9/, /10/, /11/, /12/, /13/, /14/.

в) настраивается «региональная» циркуляционная модель атмосферы - полная связанная атмосфера-океан циркуляционная модель с горизонтальным разрешением десятки километров (например, RCOA, MPK ГГО, RCA, HIRLAM) /5/, /7/, /11/, /12/, /13/, /14/, /15/, /16/. Данные, полученные из глобальных циркуляционных моделей, используются как граничные условия для расчёта на «региональной» модели. Выбирается период времени для каждого моделируемого сценария.

г) данные, полученные из «региональной» циркуляционной атмосферной модели, используются как граничные условия для гидрологических и гидродинамических моделей - региональных связанных моделей «лед-океан» с горизонтальным разрешением от десятков-сотен метров до десятков километров /11/, /12/, /13/, /14/, /15/, /16/, /17/, /18/, /19/, /20/, /21/. В результате получают отклик моря на все внеш-

ние воздействия в виде изменения гидрофизических и гидрохимических полей в ходе модельного периода.

Отдельной и очень трудоемкой задачей является оценка неопределенности (uncertainty) климатического предсказания (projection) на всех уровнях. Эта неопределенность связана с неточностью или неопределенностью всех используемых при моделировании данных или сценариев. Причем, поскольку общее поведение системы не является линейным и возможны синергетические взаимодействия, то простые оценки только по вариациям исходных данных или воздействующих факторов не являются исчерпывающими. На практике приходится проводить прямую оценку неопределенности, проводя весь цикл расчетов для каждого из возможных сценариев и вариантов описания системы, используя разные модели (применения ансамблевого подхода к климатическому моделированию).

### Методика

Работа основывается на подходе, разработанном для моделирования климатических процессов для Балтийского моря в рамках проекта ECOSUPPORT (<http://www.baltex-research.eu/ecosupport/>) /21/: моделирование контрольного периода 1961-2007 на модели RCOA/ERA-40 (25км) и прогностическое моделирование для периода 1961-2099 на двух моделях RCOA/HadCM3 и RCOA/ECHAM5 и сценариях эмиссии A1B и A2. При этом верификация моделей проведена по наблюдённым сезонным данным за период 1980-2006 гг. по температуре воздуха (2 м над поверхностью); площади ледяного покрова; сезонным циклам распространения ледового покрова; и т.д. /21/. Результатом моделирования является блок климатических данных за период 1957-2099 гг., включающий: компоненты скорости ветра  $u10$  и  $v10$  [м/с]; температура воздуха [ $^\circ\text{C}$ ]; относительная влажность [0 -1]; удельная влажность [кг/кг]; облачность [0-1]; давление [Па]; осадки (за последние 3 часа) [кг/м<sup>2</sup> или мм]; а также блок гидрологических и гидрохимических данных (температура вод, солёность, давление, кислород, фосфаты и др.).

В настоящей работе проведен анализ результатов /1/, полученных для района Юго-восточной Балтики из расчёта на региональной климатической модели (RCOA-hadcm3ref-a1b-25km, полная связанная атмосфера-океан циркуляционная модель с горизонтальным разрешением  $\Delta X=25$  км и дискретизацией по времени  $\Delta t=3$  часа) для всего региона Балтийского моря для периода 1957-2099 гг. и сценария эмиссии A1B (отчета IPCC /2/). Рассматривались изменения во времени базовых метеорологических параметров (температура воздуха, осадки, давление, облачность, влажность и ветер) для двух типичных точек, расположенных в море и на суше вблизи Вислинского залива (рис. 2а,б) для стандартных климатических периодов продолжительностью 30 лет /22/.

Анализ результатов расчета по модели RCOA-hadcm3ref-a1b-25km был проведен для двух точек № 40 и № 58 за период 1957 – 2099 гг. Анализируемыми параметрами были: 1) температуре воздуха; 2) осадки; 3) давление; 4) облачность; 5) относительная влажность; 6) ветер. Анализ многолетних изменений за фиксированные 30-летние периоды (1960 - 1989; 1990 - 2019; 2020 – 2049; 2050 – 2079) проводился для среднегодовых значений.

**Результат**

Анализ показывает, что по предсказаниям температура воздуха будет расти как в средних, так и в минимальных и максимальных значениях, как над сушей, так и над морем (табл. 1). Наибольшие положительные тренды (~1.7°C/период - над морем, ~2.0°C/период - над сушей) соответствуют минимальным значениям температур, наименьшие (~0.92 °C/ период) – максимальным значениям температур. Среднегодовые значения будут расти со скоростью ~1°C за 30-летний период (рис. 4, табл. 1).

Осадки, относительная влажность, облачность также имеют устойчивые положительные тренды (рис. 5, 7, 8, табл. 1).

Давление в средних величинах имеет также устойчивые положительные тренды (с большой достоверностью 0.94) с увеличением ~5 Па за 30-летний период (рис. 6, табл. 1).

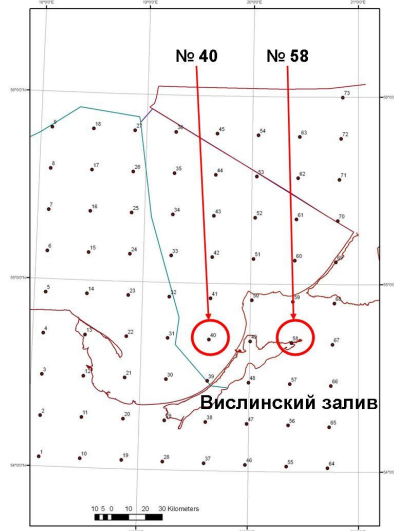


Рис. 2. Узлы расчетной сетки (RCAO-hadcm3ref-a1b-25km) вблизи Вислинского залива: точка № 40 - расположена в море, точка № 58 - на суше.

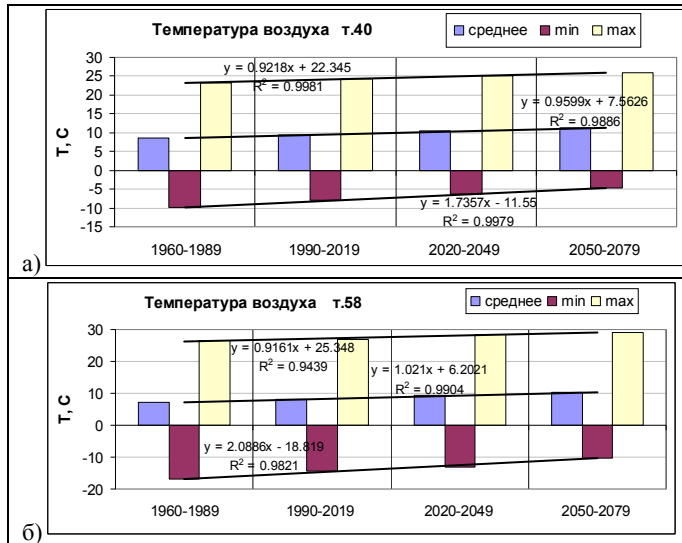


Рис. 4. Среднегодовые значения температуры воздуха (среднее, минимальное, максимальное значения и тренды) на основании прогноза модели RCAO-hadcm3ref-a1b-25km за 30-летние периоды: 1960-1989 гг., 1990-2019 гг., 2020-2049 гг., 2050-2079 гг. для точек №№ 40 (а) и 58 (б).

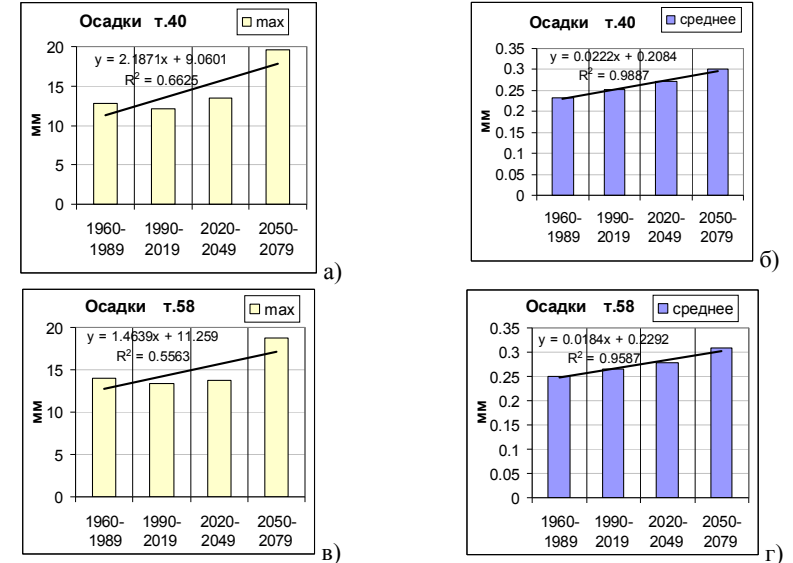


Рис. 5. Среднегодовые значения осадков (максимальное и среднее значения) на основании прогноза модели RCAO-hadcm3ref-a1b-25km за 30-летние периоды 1960-1989 гг., 1990-2019 гг., 2020-2049 гг., 2050-2079 гг. для точек №№ 40 (а, б); 58 (в, г).

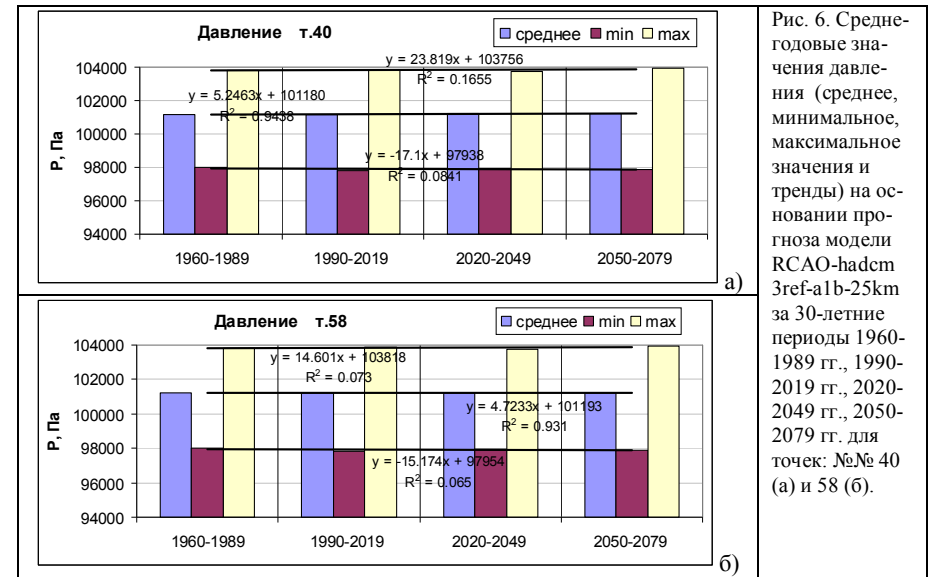


Рис. 6. Среднегодовые значения давления (среднее, минимальное, максимальное значения и тренды) на основании прогноза модели RCAO-hadcm3ref-a1b-25km за 30-летние периоды 1960-1989 гг., 1990-2019 гг., 2020-2049 гг., 2050-2079 гг. для точек №№ 40 (а) и 58 (б).

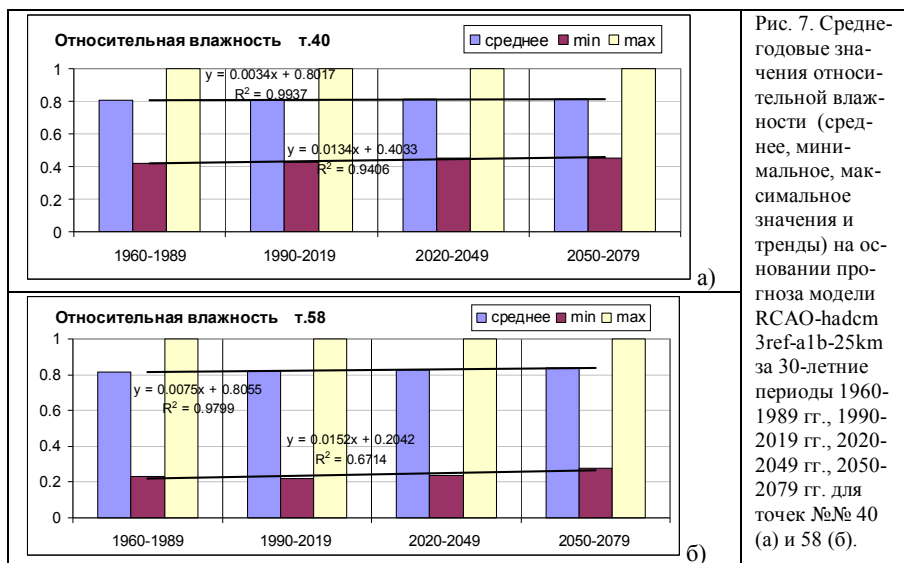


Рис. 7. Среднегодовые значения относительной влажности (среднее, минимальное, максимальное значения и тренды) на основании прогноза модели RCAO-hadcm3ref-a1b-25km за 30-летние периоды 1960-1989 гг., 1990-2019 гг., 2020-2049 гг., 2050-2079 гг. для точек №№ 40 (а) и 58 (б).

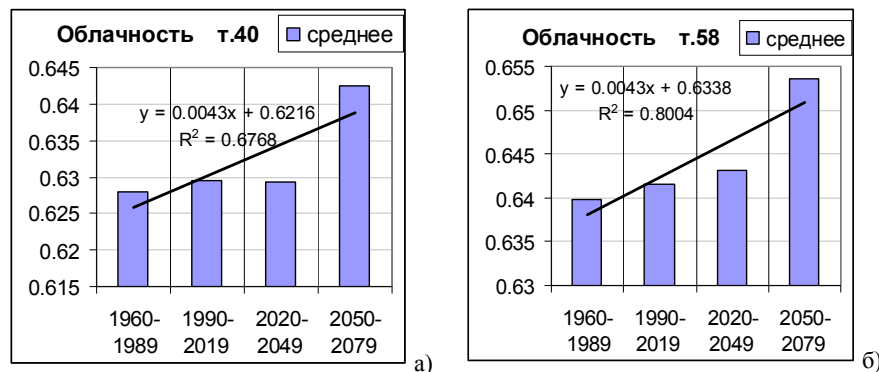


Рис. 8. Среднегодовые значения облачности (среднее значение и тренд) на основании прогноза модели RCAO-hadcm3ref-a1b-25km за 30-летние периоды 1960-1989 гг., 1990-2019 гг., 2020-2049 гг., 2050-2079 гг. для точек №№ 40 (а) и 58 (б).

Таблица 1. Результирующие тренды среднегодовых за 30-летние периоды значений метеорологических параметров.

Параметр	Скорость изменения параметра в точке № 40	Скорость изменения параметра в точке № 58
Температура воздуха	средн.: + 0.96 °C за период (↑) мин.: + 1.75 °C за период (↑) макс.: + 0.92 °C за период (↑)	средн.: + 1.02 °C за период (↑) мин.: + 2.09 °C за период (↑) макс.: + 0.92 °C за период (↑)
Осадки	средн.: + 0.02 мм за период (↑) макс.: + 2.19 мм за период (↑)	средн.: + 0.02 мм за период (↑) макс.: + 1.46 мм за период (↑)
Давление	средн.: + 5.25 Па за период (↑) мин.: -17.10 Па за период (↓) макс.: + 23.82 Па за период (↑)	средн.: + 4.72 Па за период (↑) мин.: -15.17 Па за период (↓) макс.: + 14.60 Па за период (↑)
Облачность	средн.: + 0.004 за период (↑)	средн.: + 0.004 за период (↑)
Относительная влажность	средн.: + 0.003 за период (↑) мин.: + 0.013 за период (↑)	средн.: + 0.008 за период (↑) мин.: + 0.015 за период (↑)

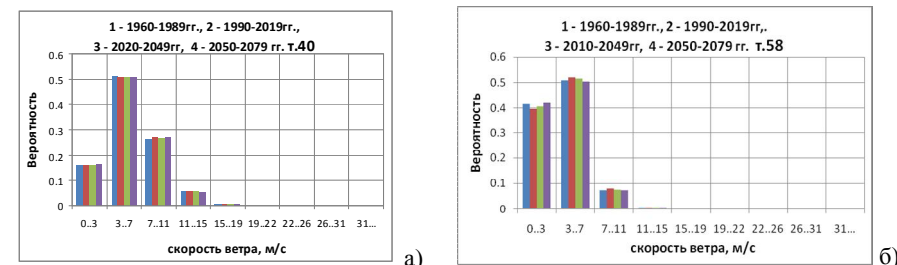


Рис. 9. Средняя за 30-летний период гистограмма вероятности повторяемости скорости ветра в течение года на основании прогноза модели RCAO-hadcm3ref-a1b-25km для 30-летних периодов: 1960-1989 гг., 1990-2019 гг., 2020-2049 гг., 2050-2079 гг. для точек: а) № 40 (море), б) № 58 (суша).

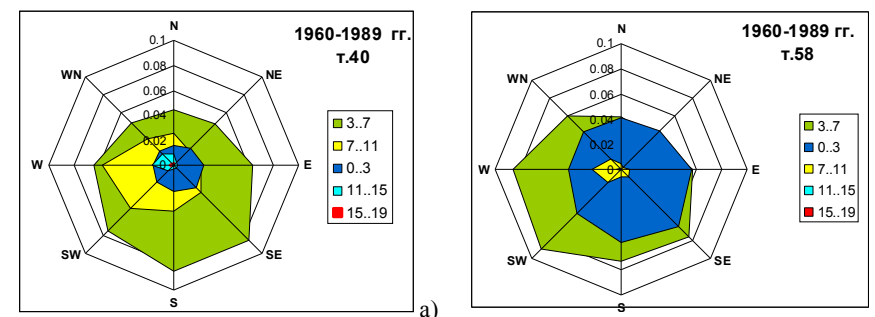


Рис.10. Среднее за 30-летний период распределение вероятности направлений ветров для точек: а) № 40 (море), б) № 58 (суша). Графики от периода к периоду меняются незначительно, поэтому для примера представлено распределение для периода 1960-1989 гг.

На основании прогноза модели RCAO-hadcm3ref-a1b-25km /1/ для точек № 40 (море) и № 58 (суша) для 30-летних периодов (1960-1989, 1990-2019, 2020-2049, 2050-2079 гг.) проведена оценка вероятности появления ветра определенной силы (рис. 9а,б, табл. 2). Ветровой режим над морем (т. № 40) и над сушей (т. № 58) разный. Так, над морем наиболее вероятны ветра со скоростями 3-7 м/с (в среднем вероятность 51%), далее по нисходящей – ветра со скоростью 7-11 м/с (27%), 0-3 м/с (16%), 11-15 м/с (6%), 15-19 м/с (0.7%). Сильные ветра (более 20 м/с) маловероятны (рис. 10а, табл. 2). Над сушей наиболее вероятны ветра со скоростями 3-7 м/с (в среднем вероятность 51%), далее по нисходящей – ветра со скоростью 0-3 м/с (41%), 7-11 м/с (7%), 11-15 м/с (0.5%), Сильные ветра (более 15 м/с) маловероятны (рис. 10б, табл. 2).

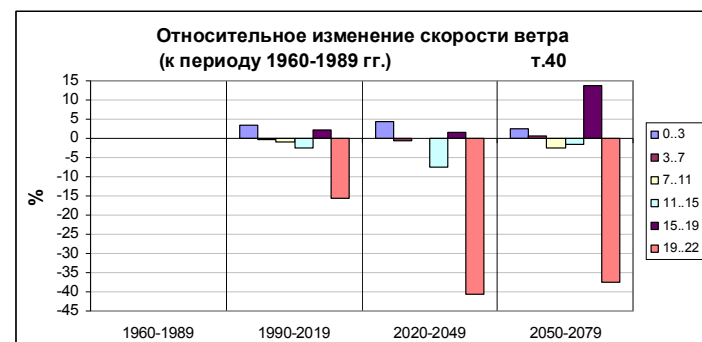
Таблица 2. Распределения вероятности средней скорости ветра за четыре 30-летних периода над морем (т. № 40) и над сушей (т. № 58).

№ 40 (море)					
Скорость ветра (м/с)	Периоды				Среднее
	1960-1989 гг.	1990-2019 гг.	2020-2049 гг.	2050-2079 гг.	
0..3	0.16	0.162	0.164	0.161	0.16
3..7	0.51	0.508	0.507	0.512	0.51
7..11	0.27	0.266	0.268	0.261	0.27
11..15	0.06	0.057	0.054	0.057	0.06
15..19	0.007	0.007	0.007	0.008	0.007
19..22	0.0004	0.0003	0.0002	0.0002	0.0003
22..26	0.00004	0	0	0	0.00001
№ 58 (суша)					
Скорость ветра (м/с)	Периоды				Среднее
	1960-1989 гг.	1990-2019 гг.	2020-2049 гг.	2050-2079 гг.	
0..3	0.40	0.41	0.420	0.415	0.41
3..7	0.52	0.52	0.503	0.508	0.51
7..11	0.08	0.08	0.073	0.071	0.07
11..15	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
15..19	0.0001	0.00007	0.00001	0.00002	0.00003
19..22	0	0	0	0	0.000

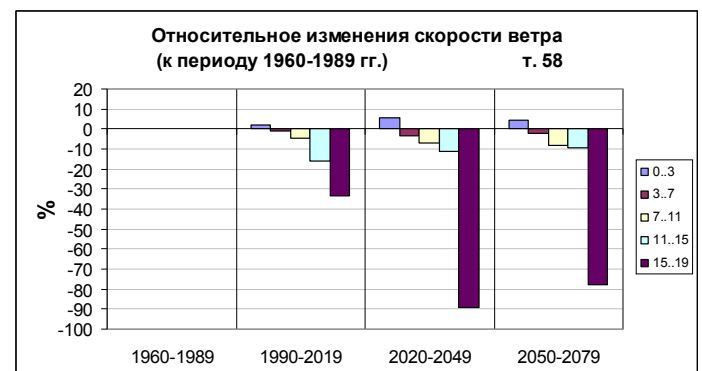
Проведена оценка относительного изменения скорости ветра по отношению к периоду 1960-1989 гг. в процентах (рис. 11, табл. 3).

Анализ показывает, что над морем по отношению к периоду 1960-1989 гг. количество сильных ветров (19-22 м/с) уменьшается. Также уменьшается количество ветров с силой 11-15 м/с. Увеличится количество слабых ветров 0-3 м/с и ветров с силой 15-19 м/с (табл. 3).

Количество сильных ветров (15-19 м/с) над сушей имеет тенденцию к уменьшению по отношению к периоду 1960-1989 гг. Также уменьшается количество ветров с силой 11-15 м/с и средних ветров со скоростью 3-7 м/с.



а)



б)

Рис. 11. Относительные изменения скорости ветра на основании прогноза модели RCAO-hadcm3ref-a1b-25km по отношению к периоду 1960-1989 гг. в процентах (для 30-летних периодов 1960-1989 гг., 1990-2019 гг., 2020-2049 гг., 2050-2079 гг. для точек: а) № 40 (море), б) № 58 (суша)).

Количество ветров редней силы (7-11 м/с) имеет тенденцию к уменьшению. Увеличится количество слабых ветров 0-3 м/с и ветров с силой 15-19 м/с (табл. 3).

Таким образом, проведенный анализ данных модели RCAO-hadcm3ref-a1b-25km свидетельствует об уменьшении вероятности появления сильных ветров и увеличении вероятности появления слабых ветров в районе Вислинского залива, что пока хорошо согласуется с установленной тенденцией в изменении ветрового режима в районе Юго-восточной Балтики при анализе результатов наблюдений ветра за периоды 1948-1975 гг. (~30 лет) и 1949-1988 гг. (~40 лет) на посту Балтийск /23/, /24/.

Таблица 3. Относительное изменение скорости ветра по отношению к периоду 1960-1989 гг. в процентах над морем (т.№ 40) и над сушей (т. № 58).

№ 40 (море)					
Скорость ветра (м/с)	Периоды				Примечание
	1960-1989 гг.	1990-2019 гг.	2020-2049 гг.	2050-2079 гг.	
0..3	0	3.3	4.4	2.4	Увеличение вероятности
3..7	0	-0.2	-0.5	0.6	
7..11	0	-1.0	0.1	-2.5	
11..15	0	-2.5	-7.6	-1.6	Уменьшение вероятности
15..19	0	2.2	1.5	13.8	Увеличение вероятности
19..22	0	-15.7	-40.7	-37.5	Уменьшение вероятности
№ 58 (суша)					
Скорость ветра (м/с)	Периоды				Примечание
	1960-1989 гг.	1990-2019 гг.	2020-2049 гг.	2050-2079 гг.	
0..3	0	2.0	5.7	4.5	Увеличение вероятности
3..7	0	-0.7	-3.2	-2.1	Уменьшение вероятности
7..11	0	-4.3	-6.9	-8.4	Уменьшение вероятности
11..15	0	-15.8	-11.5	-9.6	Уменьшение вероятности
15..19	0	-33.4	-88.9	-77.8	Уменьшение вероятности

### Заключение

Проведённый анализ изменения основных параметров (температуры воздуха, осадки, давление и т.д.) для двух, расположенных в море и на суше точек вблизи Вислинского залива, на основании прогноза модели RCAO-hadcm3ref-a1b-25km (1957-2099 гг.) /1/ для района Юго-восточной Балтики, показал, что температура воздуха будет расти как в средних, так и в минимальных и максимальных значениях, как над сушей, так и над морем. Среднегодовые значения будут расти со скоростью ~1°C за 30-летний период. Осадки, относительная влажность, облачность и давление в средних величинах также имеют устойчивые положительные тренды. Результаты анализа согласуются с ранее полученными данными /2/, /5/, /11/, /16/. Предсказывается уменьшение вероятности появления сильных ветров и увеличение слабых ветров в районе Вислинского залива, что хорошо согласуется с установленной для современного периода тенденцией в изменении ветрового режима в районе Юго-восточной Балтики /27/.

Анализ проводился при поддержке грантов РФФИ № 10-05-00540, 08-05-01023, 08-05-9242, 10-05-00472.

### Литература

1. ECOSUPPORT homepage, <http://www.baltex-research.eu/ecosupport/>
2. IPCC. Climate Change 2007, Synthesis Report.
3. Мелешко В. П., Катцов В. М., Мурвис В. М., Говоркова В. А., Павлова Т. В. Климат России в XXI веке. Часть 1. Новые свидетельства антропогенного изменения климата и современные возможности его расчета // Метеорология и гидрология. –2008.–№ 6.–С. 5-19.
4. Говоркова В. А., Катцов В. М., Мелешко В. П., Павлова Т. В., Школьник И. М. Климат России в XXI веке. Часть 2. Оценка пригодности моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМIP3 для расчетов будущих изменений климата России // Метеорология и гидрология. –2008.–№ 8.–С. 5-19.
5. Школьник И.М., Мелешко В.П., Катцов В.М. Возможные климатические изменения на европейской части Российской Федерации и прилегающих территориях к концу 21-го века: расчеты по региональной модели ГГО им. Воейкова. // Метеорология и гидрология. - № 3, 2006. - С. 5-16.
6. Omstedt A., Gustafsson B., Rodhe J., and Wallin G. Use of Baltic Sea modelling to investigate the water cycle and the heat balance in GCM and regional climate models // J. Clim. Res. 2000. V.15. P. 95–108.
7. Beniston, M., D. B. Stephenson, O. B. Christensen, C. A. T. Ferro, C. Frei, S. Goyette, K. Halsnaes, T. Holt, K. Jylhä, B. Koffi, J. Palutikof, R. Schöll, T. Semmler, K. Woth. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections // J. Climatic Change. 2007. V. 81. P. 71–95. DOI 10.1007/s10584-006-9226-z.
8. Bergström S., Carlsson B., Gardelin M., Lindström G., Pettersson A., and Rummukainen M. 2001. Climate change impacts on runoff in Sweden - assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modelling. Climate Res. 16,101–112.
9. Räisänen J., Hansson U., Ullerstig A., Döscher R., Graham L.P., Jones C., Meier H.E.M., Samuelsson P., and Willén U. European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios // J. Clim. Dynamics. 2004. V.22. P.13–31.
10. ECOSUPPORT: advanced modeling tool for scenarios of the Baltic Sea ECOSystem to SUPPORT decision making. BONUS Project 125. Coordinator - Markus Meier, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 2008. Internet resource: [www.bonusportal.org](http://www.bonusportal.org)
11. Meier, H. E. M. Regional ocean climate simulations with a 3D ice-ocean model for the Baltic Sea. Part 1: model experiments and results for temperature and salinity // J. Clim. Dyn. 2002. V. 19. P. 237-253.
12. Meier, H. E. M., Broman, B. and Kjellström, E. Simulated sea level in past and future climates of the Baltic Sea // J. Clim. Res. 2004. V. 27. P. 59-75.
13. Meier, H. E. M., Döscher, R., Broman, B. and Piechura, J. The major Baltic inflow in January 2003 and preconditioning by smaller inflows in summer/autumn 2002: a model study // J. Oceanologia. 2004(b). V. 46. P. 557-579.

14. Meier, H. E. M., Broman, B., Kallio, H. and Kjellström, E (2006). Projections of future surface winds, sea levels, and wind waves in the late 21st century and their application for impact studies of flood prone areas in the Baltic Sea region. In: SCHMIDT-THOME, P., ED.: Sea Level Changes Affecting the Spatial Development of the Baltic Sea Region. Geological Survey of Finland, Special Paper 41, 23-43.
15. Döscher R., Willén U., Jones C., Rutgersson A., Meier H.E.M., Hansson U., and Graham L.P. 2002. The development of the regional coupled ocean-atmosphere model RCAO. Boreal Environ. Res. 7,183–192.
16. Graham, L.P. Climate Change Effects on River Flow to the Baltic Sea. // Ambio. 2004. V. 33, N. 4-5, P. 235-241.
17. Kauker, F., and H. E. M. Meier. Modeling decadal variability of the Baltic Sea: 1. Reconstructing atmospheric surface data for the period 1902–1998 // J. Geophys. Res. 2003. 108(C8), 3267, doi:10.1029/2003JC001797.
18. Meier, H. E. M., and F. Kauker. Modeling decadal variability of the Baltic Sea: 2. Role of freshwater inflow and large-scale atmospheric circulation for salinity // J. Geophys. Res. 2003. 108(C11), 3368, doi:10.1029/2003JC001799
19. Gustafsson B. Sensitivity of Baltic Sea salinity to large perturbations in climate // J. Clim. Res. 2004. V.27. P. 237-251.
20. Rummukainen M. The Swedish Regional Climate Modelling Programme, SWECLIM: a review // Ambio. 2004. V.33. P. 176–182.
21. Meier, H. E. M. Transient scenario simulations for the Baltic Sea for 1961-2099. A presentation for the ECOSUPPORT project meeting in Institute of Oceanology PAS, Poland, Sopot: WP 4 Workshop, Sopot 6-7 September 2010.
22. Груза Г.В., Ранькова Э.Я. Оценка предстоящих изменений климата на территории Российской Федерации // Метеорология и гидрология. –2009.–№ 11.–С. 15-29.
23. Схема противоползневых и берегоукрепительных сооружений на побережье Балтийского моря в пределах Калининградской области // Том 1, книга 1. Природные условия и гидрометеорологический режим Калининградского побережья Балтики. Светлогорск, 1999. 130 с.
24. Чубаренко Б.В., Есюкова Е.Е. Вероятные сценарии отклика на изменения климата в Юго-Восточной Балтике // Физические проблемы экологии (экологическая физика); под ред. В. И. Трухина и др. 2008. № 15. С. 382–392.
25. Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. / BALTEX Assessment of Climate Change Author Team. - 2008, XXII, 474 p.- 151 illus., 70 in color.- ISBN: 978-3-540-72785-9
26. BALTEX Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Chapter Summaries. First International Conference on the Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin on 22-23 May 2006 in Göteborg Sweden. Editors: The BACC lead author group, 26 pages, June 2006.
27. Стонт Ж.И., Чубаренко Б.В., Гуцин О.А. Изменчивость гидрометеорологических характеристик для побережья Юго-восточной Балтики // Изв. РГО.- 2010.-Т.142, Вып.4.-С. 48.-56.

УДК 551.465.62 + 519.246.8 + 504.064.2

#### МЕЖГОДОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПОЛЯ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ИНДИЙСКОГО ОКЕАНА В ПЕРИОД 1985-2007 ГГ.

А.Н. Жуков, А.А. Латушкин, В.В. Пустовойтенко, А.А. Сизов

По данным стационарных измерений атмосферного давления в приземном слое побережья северной части Индийского океана проведен анализ доминирующих тенденций их межгодовой изменчивости за 1985-2007 г.г. Исследована пространственная неоднородность климатических колебаний этого параметра для разных частей Аравийского моря.

Аравийское море привлекает внимание исследователей не только тем, что оно относится к числу самых больших окраинных морей на планете, но и уникальным муссонным режимом управления циркуляционными процессами. Такой сменны крупномасштабных движений в сезонном цикле как в северной части Индийского океана не наблюдается нигде более в Мировом океане [1]. Общие представления об особенностях динамики воздушных и водных масс Аравийского моря и Индийского океана в целом сложились достаточно давно [2, 3]. Однако, детальное изучение особенностей этих процессов для Аравийского моря стало возможным только с конца 80-х годов прошлого века (проекты ARABESQUE, JGOFS и другие) [4, 5]. Вместе с тем, отдельные вопросы, например, степень и механизмы влияния межгодовых колебаний параметров атмосферы и гидросферы на биопродуктивность Аравийского моря и ее пространственное распределение до сих пор остаются недостаточно исследованными [6, 7].

Цель данной работы - проведение качественного анализа основных тенденций крупномасштабной изменчивости поля атмосферного давления Аравийского моря в целом и его частей по данным стационарных измерений на межгодовых масштабах за 1985-2008 г.г. Среднемесячные данные стационарных измерений атмосферного давления (P, гПа) в приземном слое за 1985-2007 г.г. были взяты из базы NCDC (<http://dss.ucar.edu/-datasets/ds570.0>). В качестве дополнительного источника данных по атмосферному давлению был использован массив ре-анализа (<http://index-of/pub/reanalysis-1/month/grb2d.lola/>) за 1949-2010 г.г. Для анализа был выбран фрагмент поверхности в пределах 5.0° - 31.0° с.ш., 43.0° - 77.0° в.д. (рис. 1).

При подготовке для анализа данных стационарных измерений пропуски в рядах наблюдений отдельных станций, если пробелы составляли не более 1-2 лет подряд, заполнялись с помощью линейной интерполяции. При этом результаты интерполяции корректировались по полным данным близлежащих, соседних станций [9]. Правомочность такого подхода для характеристики климатических изменений исследуемой территории обуславливается сходством формирования основных черт мезоклимата и соответствием допустимых пределов микроклиматических различий [10].

Пропуски в измерениях по отдельным узлам спутниковых наблюдений, в основном связанные с наличием облачности, также заполнялись с помощью линей-



ной интерполяции. При этом в первую очередь использовались данные не менее чем по двум ближайшим узлам за тот же месяц, либо за предыдущий и последующий месяцы для этого же узла. Если такие данные для какого-либо узла отсутствовали, то рассчитывалось среднее для него на этот месяц значение температуры за все время наблюдений [11].

В качестве аналитической основы в данной работе был использован упрощенный вариант метода внутриспектрального анализа (ВСА) с расчетом поля градиента ( $\Delta$ ), описанный в [12, 13]. Метод ВСА является аналитической реализацией ритмодинамического подхода к изучению природных процессов, предложенного в [14]. При этом величина градиента рассчитывается нестандартно, как разница между среднеарифметическими величинами двух последних и двух первых значений временных рядов исследуемого параметра в каждом узле сетки данных после удаления из них высокочастотных (ВЧ) составляющих.

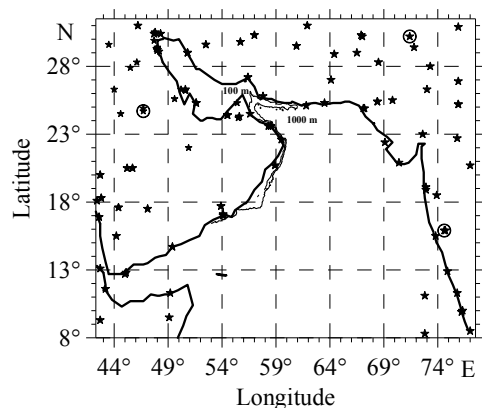


Рис. 1. Расположение метеостанций района Аравийского моря, данные измерений атмосферного давления которых за 1985-2007 г.г. были использованы в работе.

Последнее выполняется с помощью фильтра скользящего среднего (ФСС) с величиной периода не менее трети от общей длины рядов. В этом случае значение  $\Delta$  рассматривается как аналог амплитуды наиболее энергетически значимой гармоники или группы гармоник в низкочастотной (НЧ) области спектра ряда. С точки зрения ритмодинамического подхода анализа поля градиента исследуемых параметров в данном случае должно быть достаточно, для того, чтобы в первом приближении определить доминирующие тенденции и наличие связей в межгодовой изменчивости соответствующих полей.

Традиционное описание климата северной части Индийского океана как муссонного состоит в том, что летом северного полушария, когда над Азией развивается область пониженного атмосферного давления, здесь господствуют юго-западные потоки экваториального воздуха, зимой - северо-восточные потоки тропического воздуха [1, 8]. Соответственно, и облачность в этой части океана зимой составляет порядка 10-30%, а летом до 60-70% с наибольшим количеством осад-

ков. Такой тип атмосферной циркуляции обусловлен устойчивым пространственным расположением центров действия атмосферы (ЦДА) в этом регионе.

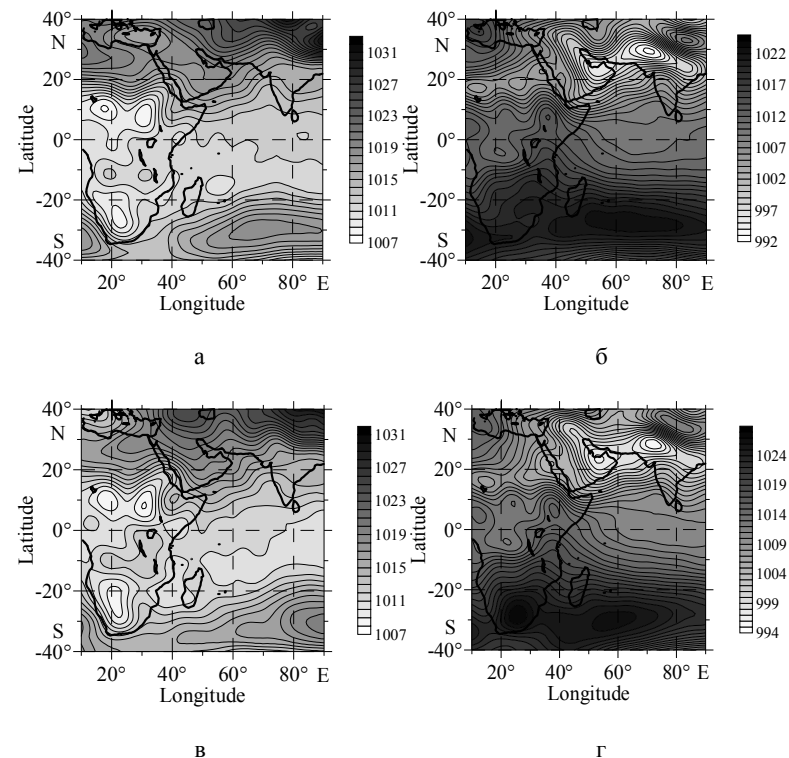


Рис. 2. Поле атмосферного давления (гПа) над Индийским океаном по данным ре-анализа в январе (а) и июле (б) 1949 г., и в январе (в) и июле (г) 2009 г.

На рис. 2 приведены примеры полей атмосферного давления для участка между 40° ю.ш. - 40° с.ш., 20°-90° в.д. для 1949 г. и 2009 г., полученные по вышеуказанным данным ре-анализа. Следует отметить, что для ЦДА южной части Индийского океана характерна относительно большая пространственная подвижность, чем для его северной части. Так, в отдельные годы центральная область Южно-Индийского атмосферного максимума может сдвигаться на восток или на запад, например, в период зимнего муссона от 70° до 90° в.д., т.е. больше, чем на 1000 км.

Результаты анализа среднемесячных данных атмосферного давления за 1985-2007 г.г. по 30 береговым пунктам наблюдений из числа показанных на рис. 1 в основном хорошо совпадают с таким описанием механизма изменчивости. На рис. 3 приведены ряды, описывающие средний годовой ход атмосферного давления за 1985-2007 г.г. для трех отдельных пунктов наблюдений, представляющих разные

участки побережья Аравийского моря. На рис. 1, обозначения этих пунктов (Эр-Рияд, Мултан, Белгаон) окаймлены зелеными кругами.

Основное отличие представленных на рис. 4 рядов состоит в разнице между наибольшими (декабрь, январь) и наименьшими (июнь, июль) значениями давления. Для западного и северного участков побережья эта величина составляет ~21.0 гПа, но на северном месячные значения в среднем на 3.0 гПа ниже, чем на западном, а для восточного - не более 7.0-8.0 гПа. Это вполне соответствует смене климатических условий от континентальных к морским для этих пунктов наблюдений.

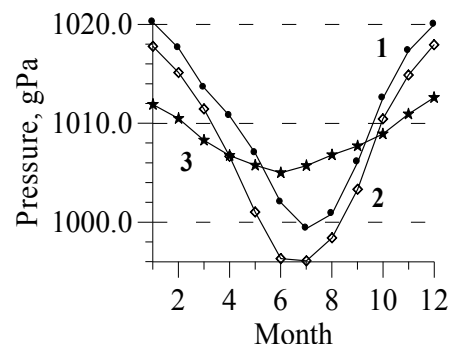


Рис. 3. Средний годовой ход атмосферного давления за 1985-2007 г.г. для побережья Аравийского моря в Эр-Рияде (Саудовская Аравия, 24.7° с.ш., 46.7° в.д.) (1), в Мултане (Пакистан, 30.2° с.ш., 71.4° в.д.) (2) и в Белгаоне (Индия, 15.9° с.ш., 74.6° в.д.) (3).

На рис. 4 приведены примеры межгодовой изменчивости рядов среднегодовых, среднелетних и среднезимних значений атмосферного давления для тех же пунктов наблюдений, что и на рис. 3. На первый взгляд, из-за множества отличий в ритмодинамике эти ряды нельзя считать квазисинхронными. Вместе с тем, при более внимательном анализе видно, что для большинства из них, несмотря на заметные различия по НЧ, характерна схожая ритмодинамика для колебаний с периодами около 5-8 лет.

Что же касается интересующих нас тенденций изменчивости наиболее НЧ составляющих, то показательно, что они совпадают для рядов средних летних и зимних значений. Это видно из рис. 5, на котором приведены ряды НЧ составляющих для тех же, вышеуказанных пунктов наблюдений. В соответствии с используемой методикой анализа они были выделены из рядов на рис. 4 путем фильтрации ФСС с периодом 8 лет. Общей тенденцией атмосферного давления на исследуемом временном отрезке в Мултане является его рост, в Белгаоне - падение, а в Эр-Рияде на фоне общего роста заметно колебание с периодом примерно 12-15 лет.

Спектральный анализ указанных рядов для всех 30 береговых пунктов наблюдений показал наличие трех общих групп гармоник-доминант с периодами 2-3, 6-8 и 11-12 лет. Причем для большинства станций на западном побережье Аравий-

ского моря, включая район Персидского залива, наибольшую амплитуду имеют постоянная составляющая (23 года) и ~11-летняя гармоника. А для станций на восточном побережье моря максимум в спектре чаще всего приходится на гармоники с периодом 2-5 лет.

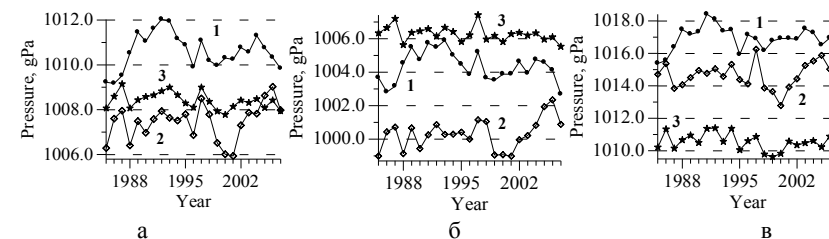


Рис. 4. Ряды средних годовых (а), средних летних (б) и средних зимних (в) значений атмосферного давления по данным 1985-2007 г.г. для побережья Аравийского моря в Эр-Рияде (1), Мултане (2) и Белгаоне (3).

Если сравнить значения  $P$  на рис. 3, 4 со средними климатическими данными по Аравийскому морю для середины прошлого века [1, 3, 15, 16], то можно заметить, что существенных изменений в этих величинах за прошедшие десятилетия не произошло. На рис. 6, а показаны кривые среднего годового хода  $P$  в Эр-Рияде за 1955-1965 и 1990-2000 г.г. (11 лет) по данным ре-анализа и NCDC. Отрезок 1955-1965 г.г. был выбран для сравнения, поскольку в климатологии 1940-1965 г.г. считаются периодом относительного похолодания, общего для всего северного полушария [10].

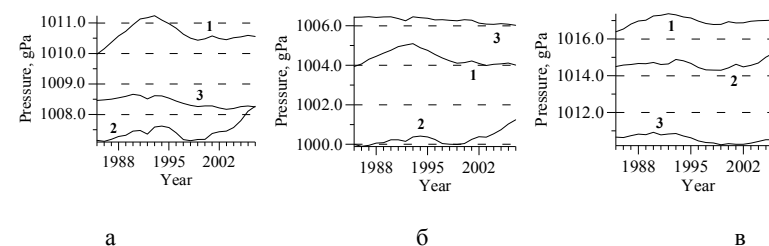


Рис. 5. Ряды НЧ составляющих средних годовых (а), средних летних (б) и средних зимних (в) значений атмосферного давления по данным 1985-2007 г.г. для побережья Аравийского моря в Эр-Рияде (1), Мултане (2) и Белгаоне (3).

Из рис. 6, а видно, что изменения относительно 50-х годов состоят в увеличении летних значений  $P$  на 2.0-3.0 гПа, а зимних на 1.5-2.0 гПа. Рис. 6, б характеризует аналогичные изменения для Белгаона. Здесь как летние, так и зимние значения  $P$  по данным ре-анализа увеличились на ~1.0 гПа. По данным же NCDC летние значения почти не изменились, а зимние относительно данных ре-анализа увели-



чились на 0.5-0.8 гПа. Близкие значения этих величин получены и для других станций на рис. 1, а.

На рис. 7 показаны картины полей среднегодовых и среднесезонных значений атмосферного давления Аравийского моря за исследуемый период 1985-2007 г.г. Из них видно, что поля средних летних и средних зимних значений  $P$  в основном повторяют на меньших масштабах структуру аналогичных полей на рис. 2. Так, для периода летнего муссона характерно существование севернее  $20^\circ$  с.ш. области пониженного атмосферного давления около 999.0-1003.0 гПа, с преобладанием циклонических условий циркуляции атмосферы.

При этом южнее этой широты располагается область повышенных значений  $P$  в пределах 1005.0-1009.0 гПа с центром в районе северной группы Мальдивских островов (рис. 7, г-е). В этой области на протяжении исследуемого периода летом преобладали антициклонические условия циркуляции атмосферы. Если сравнить структуры средних полей давления за отрезки 1985-1997 и 1998-2007 г.г., то можно увидеть, что после 1997 г. область пониженного давления существенно распространилась в зональном направлении на запад, включив в сферу своего влияния Персидский и Оманский заливы.

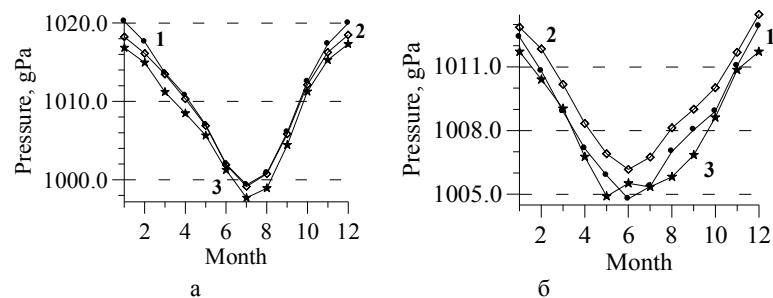


Рис. 6. Средний годовой ход атмосферного давления по данным NCDC за 1990-2001 (1) г.г. и ре-анализа за 1990-2001 (2) и 1955-1965 (3) г.г. в Эр-Рияде (а) и в Белгаоне (б).

В период зимнего муссона структура поля давления меняется на противоположную (рис. 7, ж-и). Севернее  $20^\circ$  с.ш. располагается область повышенного давления 1015.0-1017.0 гПа с центром в северной части Персидского залива и Аравийского полуострова. Южнее же область пониженного давления 1011.0-1013.0 гПа с центром у тех же северных Мальдивских островов и м. Кумари (Индия). Сравнение зимних полей давления за те же два отрезка наблюдений показывает, что после 1997 г. произошло ослабление области повышенного давления на севере Аравийского полуострова примерно на 2.0 гПа с ее частичным смещением на северо-запад.

Таким образом, летом на рассмотренных пространственных масштабах центры атмосферного давления образуют локальную дипольную структуру, ориентированную вдоль  $71^\circ$  в.д., что относительно усиливает летний муссон и незначительно смещает его основное направление к северу. Зимой инверсная дипольная

структура располагается по диагонали примерно между Эр-Риядом и м. Кумари (Индия), что почти ортогонально направлению зимнего муссона и может незначительно смещать его в юго-восточном направлении.

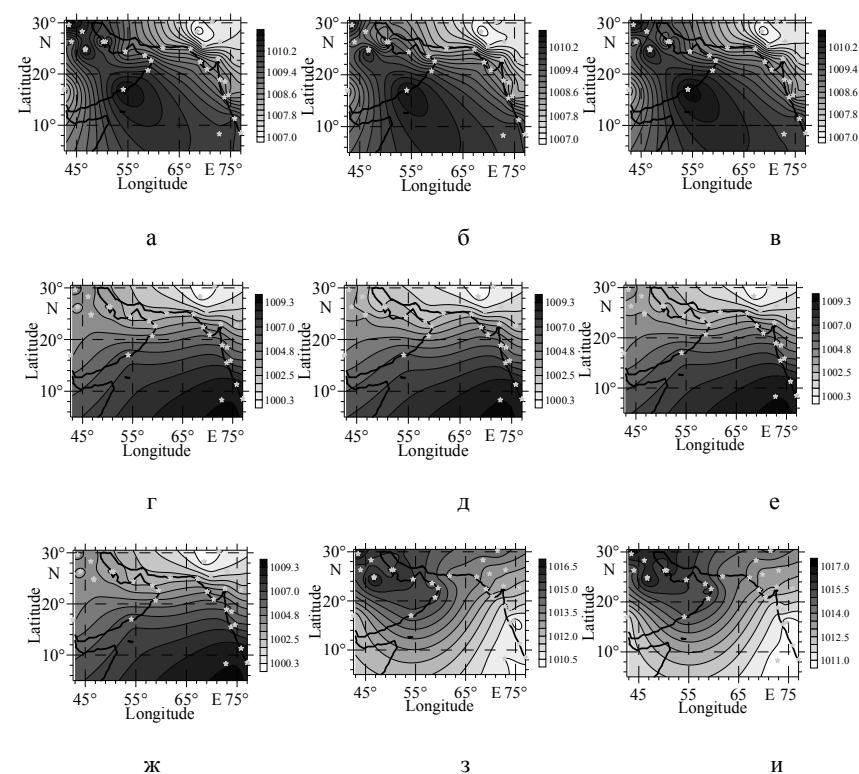


Рис. 7. Поля средних годовых (а, б, в), средних летних (г, д, е) и средних зимних (ж, з, и) значений атмосферного давления (гПа) для трех отрезков ряда наблюдений (1985-1997, 1998-2007, 1985-2007 г.г., слева направо).

Анализ средних годовых полей за исследованный период также показал наличие устойчивого крупномасштабного разделения их пространственной структуры на два больших участка, расположенных к северо-востоку и к юго-западу от восточного побережья Аравийского моря между Ормузским проливом и центральным участком Малабарского берега Индии. При этом на юго-западе почти всю акваторию моря до 1997 г. занимала область повышенного давления 1009.0-1011.0 гПа, включая почти весь Аравийский полуостров кроме его крайней западной части. А на северо-востоке располагалась область пониженного давления 1007.0-1008.5 гПа, которая после 1997 г. стала смещаться к юго-западу, изменяя в Персидском и Оманском заливах в последующем десятилетии в среднем антицикло-

нические условия циркуляции атмосферы на циклонические. Причем основным источником таких перемен, видимо, стали изменения летних значений атмосферного давления.

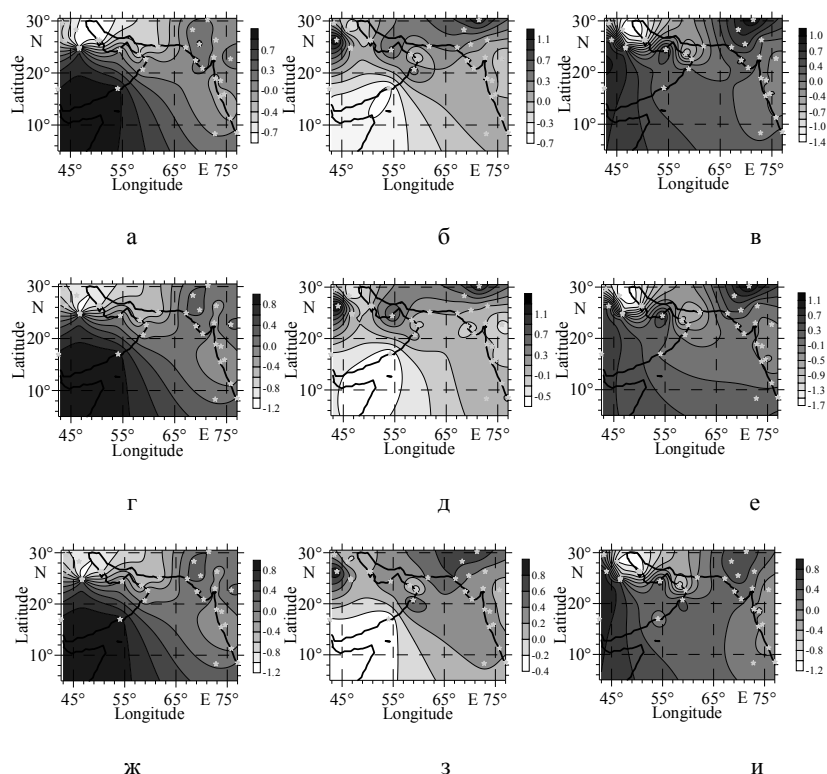


Рис. 8. Поля градиента средних годовых (а, б, в), средних летних (г, д, е) и средних зимних (ж, з, и) значений атмосферного давления (гПа) для трех отрезков ряда наблюдений (1985-1997, 1998-2007, 1985-2007 г.г., слева направо).

Эти же изменения отчетливо видны и в поле градиента атмосферного давления (рис. 8). Характерной чертой этих полей среднегодовых и среднесезонных значений  $\Delta(P)$  является смена направления его изменчивости для отдельных районов между 1985-1997 и 1998-2007 г.г. преимущественно на севере Аравийского моря. В частности, это видно и из рис. 5, 6 на примере рядов давления в Эр-Рияде. На этих рядах в большей или меньшей степени выраженный рост давления в начале и середине 90-х годов позднее сменился его падением. Как это будет видно ниже, это повлекло за собой снижение температуры воды в поверхностном слое для северо-западной части моря.

В структуре полей на рис. 8 можно выделить три основных участка. Это два района на западе моря - по берегам Персидского и Оманского заливов на северо-

западе и в пределах большей части Аравийского полуострова на юго-западе. Еще один район на востоке расположен преимущественно по побережью Индии. Для первого района характерны отрицательные значения  $\Delta P$  до  $-0.8$  -  $-1.1$  гПа, особенно для периода 1985-97 г.г. и в летнее время. В этот же период во втором районе на Аравийском полуострове преобладали положительные значения  $\Delta(P)$ , особенно в зимние полугодия, порядка  $+0.7$  -  $+0.8$  гПа. В третьем районе на территории Индии существенных изменений  $\Delta(P)$  в это время не происходило.

В течении 1998-2007 г.г. структура поля  $\Delta P$  стала меняться в противоположную сторону. В южной части Аравийского полуострова появился участок отрицательных значений градиента ( $\sim -0.3$  -  $-0.5$  гПа). А на крайнем северо-западе и северо-востоке - два участка с положительными значениями  $\Delta(P)$  ( $\sim -0.6$ - $0.8$  гПа). (Здесь следует заметить, что состояние второго из этих участков - на северо-востоке представляет особый интерес для понимания климатических изменений, происходящих в экосистеме Аравийского моря. С помощью данных ре-анализа особенности такого влияния будут рассмотрены ниже, в четвертом разделе статьи.) Изменения, происходившие в это время в поле градиента на остальной части побережья Индии по-прежнему были незначительными. Такая динамика поля  $\Delta(P)$  хорошо совпадает с приведенными выше результатами спектрального анализа среднегодовых рядов атмосферного давления.

Действительно, доминирование в спектрах этих рядов НЧ гармоник было характерно для станций, расположенных на западном и северном побережьях Аравийского моря. А в спектрах рядов станций восточного побережья преобладали ВЧ гармоника, т.е. в этих рядах практически отсутствовал трендовый характер изменчивости. В целом, за 1985-2007 г.г., как это видно из рис. 8, в, е, и, под влиянием области с преобладанием активных циклонических условий циркуляции атмосферы оказался участок акватории моря в районе Персидского и Оманского заливов. На остальной же части акватории доминировали антициклонические условия циркуляции атмосферы.

Таким образом, использование метода ВСА в данном случае позволило на качественном уровне не только показать доминирующие тенденции в динамике поля атмосферного давления, но и определить характерные пространственные масштабы климатической изменчивости Аравийского моря. В первую очередь, к их числу относятся величины, сравнимые с 2000-3000 км (т.е., близкие к общим размерам Аравийского моря) и с 300-500 км, как отвечающими за крупномасштабную анизотропию гидрофизических полей этого региона.

## Литература

1. Канаев В.Ф., Нейман В. Г., Парин Н.В. (1975) Индийский Океан. - М.: Мысль, 284 с.
2. Schott, G. (1935) Geographie des Indischen und Stillen Ozeans. - Hamburg (Boysen).

3. Муромцев А.М. (1959) Главное направление в гидрологии Индийского океана. - Л.: Гидрометиздат, 440 с.
4. Deep Sea Research (1998) Part II, V. 45, № 10-11.
5. Deep Sea Research (1999) Part II, V. 46, № 8-9.
6. Prakash, S., and Ramesh, R. (2007) Is the Arabian Sea getting more productive // Science, 92. - pp. 667-671.
7. Sergey Piontkovski, Adnan Al-Azri, and Khalid Al-Hashmi (2010) Seasonal and interannual variability of chlorophyll a in the Gulf of Oman compared to the open Arabian Sea regions // International Journal of Remote Sensing.
8. Tomczak M., Godfrey J.S. (2003) Regional Oceanography: an Introduction. Butler and Tanner Ltd., Great Britain, Parts 11-13. pp. 175-228.
9. Еремеев В.Н., Баянкина Т.М., Жуков А.Н., Лебедев Н.Е., Пустовойтенко В.В., Сизов А.А., Сухих Л.И. О волновых свойствах пространственной изменчивости полей температуры воздуха в Северной Евразии на межгодовых масштабах // Доп. НАН України. - 2007. - № 1. - С. 111-116.
10. Климатология (1989). - Л.: Гидрометиздат, 267 с.
11. Еремеев В.Н., Жуков А.Н., Лебедев Н.Е., Сизов А.А. Пространственная анизотропия межгодовой изменчивости температуры воды Черного моря (по спутниковым данным) // Исследование Земли из космоса. - 2007. - № 5. - С. 3-10.
12. Eremeev, V.N., Jukov, A.N., Piontkovski, S.A., Sizov, A.A. (2009) Coupling Between Interannual Fluctuations of the Sea Surface Temperature and Zooplankton Biomass in the Tropical Atlantic Ocean // International Journal of Environmental Studies. - V. 66, № 5. - pp. 539-546.
13. Eremeev, V.N., Jukov, A.N., Piontkovski, S.A., Sizov, A.A. (2010) Interannual variability of the chlorophyll a and sea surface temperature of the Black Sea // International Journal of Remote Sensing.
14. Еремеев В.Н., Жуков А.Н., Сизов А.А. Исследование особенностей ритмодинамики межгодовой изменчивости гидрометеорологических и гидрологических процессов в прибрежных зонах // Доклады РАН. - 2006. - Т. 409, № 2. - С. 524-527.
15. Wyrтки, К. (1973) Physical oceanography of the Indian Ocean; In: The Biology of the Indian Ocean, (ed.) Zeitzschel B. (New York: Springer-Verlag), pp. 18-36.
16. Swallow, J.C. (1984) Some aspects of the physical oceanography of the Indian ocean // Deep-Sea Research, V. 3, № 6-8, pp. 639-650.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ВОЗВЫШЕНИЙ  
ВЗВОЛНОВАННОЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ПРИ АНАЛИЗЕ ДАННЫХ АЛЬТИМЕТРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Запелалов А.С.<sup>1</sup>, Показеев К.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Морской гидрофизический институт НАН Украины

<sup>2</sup>Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Проведён анализ возможности решения задачи восстановления распределения возвышений морской поверхности по данным альтиметрических измерений. Показаны ограничения в применении модели Грама-Шарлье для расчёта формы отражённого от морской поверхности радиоимпульса. Построена комбинированная модель плотности вероятностей свободная от этих ограничений. В области малых значений случайной величины комбинированная модель близка к модели Грама-Шарлье, в области больших значений – к распределению Гаусса.

#### Введение

При вертикальном зондировании с космических аппаратов форма отражённого от морской поверхности радиоимпульса описывается моделью Брауна [1], представляющей собой свертку трех функций, одна из которых определяется плотностью вероятностей возвышений морской поверхности. Это позволяет решать обратную задачу - по радиосигналу оценивать параметры распределения возвышений взволнованной поверхности [2, 3]. Очевидно, что успех в решении обратной задачи зависит от того, насколько корректно модель плотности вероятностей описывает морскую поверхность.

Длительное время в задачах рассеяния преобладал подход, в рамках которого использовалось представление границы раздела океан-атмосфера, как случайной движущейся гауссовой поверхности. Исследования последних десятилетий показали необходимость учитывать нелинейные эффекты в поле морских поверхностных волн, приводящие к отклонению распределения возвышений морской поверхности от распределения Гаусса [4-6].

Целью настоящей работы является анализ возможностей и ограничений в применении нелинейных моделей при расчёте дисперсии, асимметрии и эксцесса распределения возвышений взволнованной морской поверхности в приложениях, связанных с дистанционным зондированием. Анализ проводится для трёх моделей: модели Грама-Шарлье [7], комбинированной модели [8] и модели Хоу [9].

#### Модель Брауна

Всю информацию о расстоянии от альтиметра до морской поверхности и о статистических характеристиках взволнованной поверхности несёт передний фронт отражённого радиоимпульса. При квазивертикальном зондировании средняя форма отражённого радиоимпульса описывается сверткой (модель Брауна [1])

$$V(t) = F_r(t) * s_r(t) * q_s(t), \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $F_r(t)$  – форма импульса, отраженного от плоской поверхности;  $s_r(t)$  – форма зондирующего импульса;  $q_s(t)$  – плотность вероятностей точек зеркального отражения; символ  $*$  – означает свертку.

Функция  $q_s(t)$  рассчитывается путем преобразования плотности вероятностей возвышений морской поверхности  $P(\eta)$  с помощью соотношения

$$t = \eta/(c/2), \quad (2)$$

связывающего возвышение поверхности  $\eta$  и время  $t$ , где  $c$  – скорость света [7]. Поскольку преобразование (2) является линейным, асимметрия и эксцесс распределений  $q_s(t)$  и  $P(\eta)$  равны между собой.

### Модели плотности вероятностей возвышений морской поверхности

*Модель Грама-Шарлье*, описывает плотность вероятностей в слабо нелинейном волновом поле, распределение которого можно отнести к квазигауссовым распределениям. В настоящее время данная модель является основной моделью описывающей влияние нелинейных эффектов в поле морских поверхностных волн на рассеяние электромагнитного излучения [10].

В общем виде плотность вероятностей для распределения Грама-Шарлье записывается в виде [11]

$$P_{G-C}(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n H_n \left( \frac{x}{\sqrt{D_x}} \right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{1}{2} \frac{x^2}{D_x} \right) \quad (3)$$

где  $H_n$  – ортогональные полиномы Чебышева-Эрмита  $n$ -го порядка;  $a_n$  – коэффициенты ряда,  $D_x$  – дисперсия. Коэффициенты  $a_n$  рассчитываются по кумулянтам случайной величины.

Для удобства сравнения моделей в разных метеорологических ситуациях введём нормировку

$$\tilde{\eta} = \eta / \sqrt{\eta^2} \quad (4)$$

Примем, что среднее значение возвышений морской поверхности равно нулю.

Поскольку в экспериментах обычно определяют кумулянты не старше четвертого порядка, то модель плотности вероятностей возвышений морской поверхности, как правило, записывают в виде

$$P_{G-C}(\tilde{\eta}) = P_G(\tilde{\eta}) \left[ 1 + \frac{A}{6} H_3(\tilde{\eta}) + \frac{E}{24} H_4(\tilde{\eta}) \right], \quad (5)$$

где  $P_G(\tilde{\eta}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{\tilde{\eta}^2}{2} \right)$  – распределение Гаусса;  $A$  и  $E$  – асимметрия и эксцесс распределения. Модель (5) хорошо описывает плотность вероятности возвышений в области

$$|\tilde{\eta}| < 2.5. \quad (6)$$

За пределами указанной области возникают значительные искажения, возможно появление отрицательных значений функции  $P_{G-C}(\tilde{\eta})$  [11].

*Комбинированная модель* первоначально была предложена для описания компонент уклонов морской поверхности [8]. В области (6) комбинированная модель соответствует распределению Грама-Шарлье, а за её пределами – распределению Гаусса. Общими требованиями, которым должна удовлетворять комбинированная модель, являются следующие: унимодальность, наличие не более двух точек перегиба и неотрицательность. Модель имеет вид

$$P_C(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{\eta^2}{2} \right) \left\{ 1 + F(\eta) \sum_{i=3}^4 a_i H_i(\eta) \right\}, \quad (7)$$

где функция  $F$  выполняет роль весовой функции (или фильтра). Фильтр  $F$  близок к единице в области (6) и стремится к нулю за пределами этой области.

В качестве фильтра можно использовать двухпараметрическую функцию

$$F(\eta) = \exp \left[ -\left( \frac{|\eta|}{d} \right)^n \right], \quad (8)$$

где параметр  $d$  определяет область, внутри которой  $F(\eta) \approx 1$ , параметр  $n$  определяет скорость, с которой функция  $F$  стремится к нулю за пределами этой области.

Требования, налагаемые на параметры  $d$  и  $n$ , анализировались в работе [8]. Не останавливаясь подробно на этом вопросе, отметим, что оптимальными значениями для описания плотности вероятностей  $P_C(\eta)$  во всём диапазоне наблюдаемых в натуральных условиях изменений параметров  $A$  и  $E$  являются значения  $n = 3.5$  и  $d = 3$ .

*Модель Хоу* построена в работе [9] и названа здесь так по фамилии первого автора. При её построении использовался подход, в рамках которого статистическое описание случайного процесса сочетается с решением динамических уравнений. Модель Хоу имеет вид

$$P_H(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} |1 - \delta \eta| \exp(-\delta \eta) \exp\left(-\frac{1}{2} \eta^2 \exp(-2\delta \eta)\right), \quad (9)$$

где параметр  $\delta$  связан с средним уклоном морской поверхности, создаваемым доминантными волнами,

$$\varepsilon = \sqrt{\eta^2} / \lambda_0, \quad (10)$$

соотношением

$$\delta = 2\pi\varepsilon. \quad (11)$$

где  $\lambda_0$  – длина доминантных волн. При стремлении параметра  $\delta$  к нулю модель Хоу приближается к модели Гаусса, при  $\delta = 0$  получаем  $P_H(\eta) \equiv P_G(\eta)$ .

Три рассмотренные выше модели плотности вероятности возвышений морской поверхности представлены на рис. 1.



Рис. 1. Плотности вероятностей возвышений взволнованной поверхности  $P(\tilde{\eta})$ , рассчитанные для модели Хоу (штрихпунктирная линия), модели Грам-Шарлье (пунктирная линия), комбинированной модели (штриховая линия), модель Гаусса (сплошная линия).

Сравнивая модель Хоу с распределением Гаусса можно отметить, что за пределами области (6) различия резко возрастают. В области отрицательных значений  $\tilde{\eta}$  с ростом  $|\tilde{\eta}|$  значения  $P_H(\tilde{\eta})$  уменьшаются значительно быстрее, чем значения  $P_G(\tilde{\eta})$  в области положительных значений  $\tilde{\eta}$ , напротив, значения  $P_H(\tilde{\eta})$  уменьшаются значительно более медленно.

#### Сопоставление статистических моментов, рассчитанных по моделям, с результатами натуральных исследований

Для анализа соответствия моделей плотности вероятностей реальным распределениям возвышений морской поверхности воспользуемся зависимостями статистических моментов возвышения от среднего уклона поверхности  $\varepsilon$ . Для модели  $P_H$  эта зависимость выражена соотношением (11), для моделей  $P_{G-C}$  и  $P_C$  она определяется полученными в натуральных условиях соотношениями, связывающими средний уклон  $\varepsilon$  с асимметрией и эксцессом распределения:

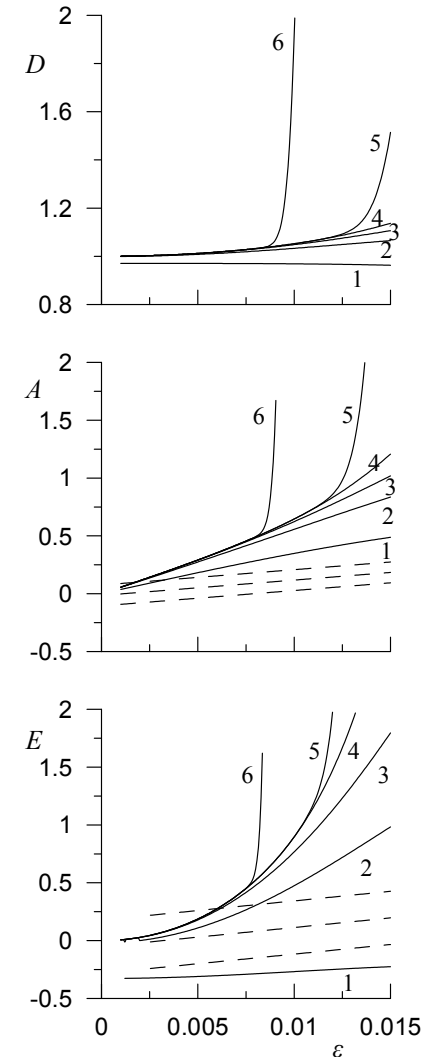
$$A_E = -0.015 + 13.28\varepsilon \pm 0.09, \quad (12)$$

$$E_E = -0.053 + 16.64\varepsilon \pm 0.23. \quad (13)$$

Нижний индекс  $E$  означает экспериментальную оценку.

Результаты анализа для модели Хоу представлены на рис. 2

Рис. 2. Модель  $P_H(\tilde{\eta})$ . Зависимости дисперсии  $D_H$  асимметрии  $A_H$  и эксцесса  $E_H$  от среднего уклона  $\varepsilon$ . Сплошные кривые 1-6 соответствуют статистическим моментам, рассчитанным при пределах интегрирования  $B = 3, 4, 5, 10, 20, 40$ . Штриховыми линиями показаны соответственно регрессии (12) и (13) и среднеквадратические отклонения от них.



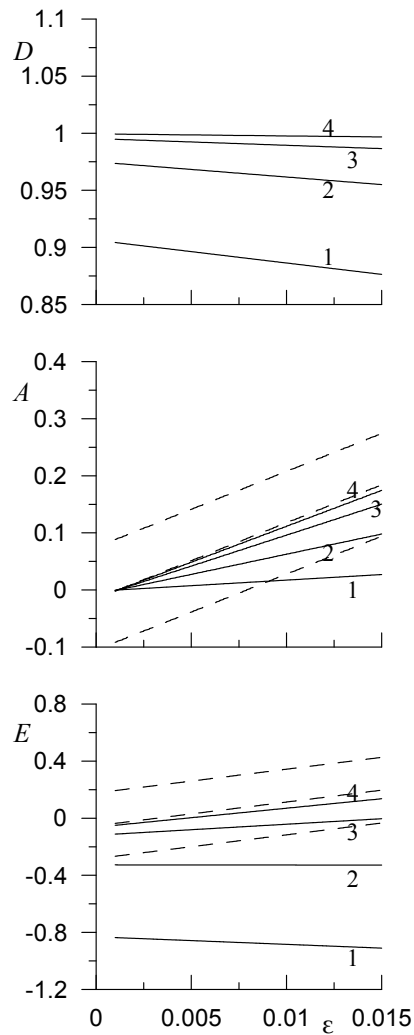
Отмеченная выше сильная асимметрия модели  $P_H(\tilde{\eta})$  приводит к тому, что при расчётах статистических моментов

$$\tilde{\mu}_n = \int_{-B}^B \tilde{\eta}^n P(\tilde{\eta}) d\tilde{\eta} \quad (14)$$

пределы интегрирования  $B$  должны быть достаточно малы. Это обстоятельство ограничивает возможности применения данной модели для описания формы отражённого радиоимпульса свёрткой (1).

Результаты аналогичных расчётов для модели Грама-Шарлье представлены на рис. 3. В отличие от модели  $P_H(\tilde{\eta})$  при расчёте статистических моментов ростом параметра с ростом параметра  $B$  значения модельных оценок статистических моментов приближаются к экспериментальным.

Рис. 3. Модель Грама-Шарлье. Зависимости дисперсии асимметрии и эксцесса от среднего уклона  $\varepsilon$ . Сплошные кривые 1-4 соответствуют кумулянтам, рассчитанным при пределах интегрирования  $B = 2.5, 3, 3.5, 4$ . Штриховыми линиями показаны соответственно регрессии (12) и (13) и среднеквадратические отклонения от них.



Отметим, что в данном случае экспериментальные оценки являются истинными, поскольку именно их мы задаём при описании моделируемого волнового поля. Это замечание остаётся справедливым при анализе комбинированной модели.

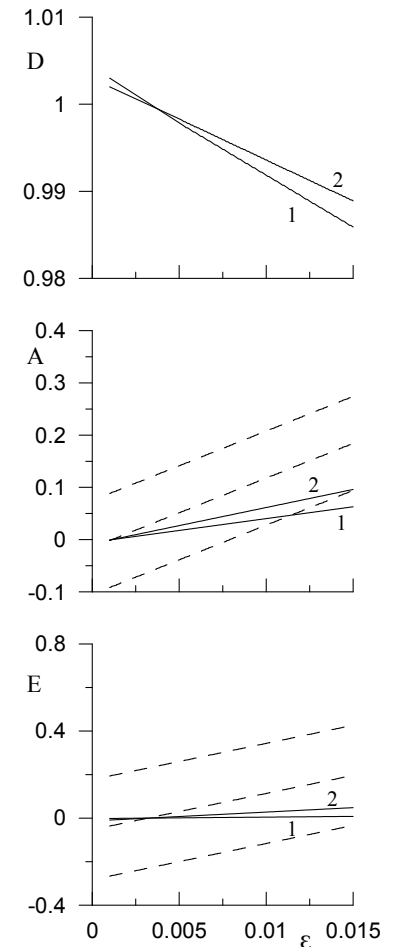
Как было отмечено выше, модель Грама-Шарлье справедлива только в ограниченном диапазоне ( $\tilde{\eta} < 2.5$ ). Соответственно при описании отражённого радиоимпульса мы можем использовать её только в усечённой форме. Погрешность, возникающая при такой аппроксимации, хорошо видна на рис. 3.

Комбинированная модель не имеет ограничений, которые присущи модели Грама-Шарлье, что позволяет использовать её без ограничений во всей области изменений параметра  $\tilde{\eta}$ . Представленные на рис. 4 оценки статистических моментов получены при значении параметра  $B$ , которое можно считать соответствующим бесконечности.

Видно, что комбинированная модель позволяет оценить дисперсию возвышений поверхности с погрешностью, не превышающей 2%. Полученные с её помощью оценки асимметрии и эксцесса ближе к экспериментальным, чем оценки, полученные с помощью модели Грама-Шарлье при  $B = 2.5$ .

На основе сравнения расчётов статистических моментов можно сделать вывод о целесообразности использования в задачах рассеяния комбинированной модели плотности вероятностей возвышений морской поверхности вместо принятой в настоящее время модели Грама-Шарлье.

Рис. 4. Комбинированная модель. Зависимости дисперсии асимметрии и эксцесса от среднего уклона  $\varepsilon$ . Сплошные кривые 1 и 2 соответствуют статистическим моментам, рассчитанным при  $d = 3$  и  $d = 3.5$ . Штриховыми линиями показаны соответственно регрессии (12) и (13) и среднеквадратические отклонения от них.



### Заключение

Ограничения в использовании модели Грама-Шарлье при больших величинах возвышений морской поверхности стимулировали построение новых моделей, позволяющих учитывать нелинейные эффекты в поле морских поверхностных волн, приводящие к отклонению распределений возвышений взволнованной поверхно-

сти от распределения Гаусса. В настоящей работе построена комбинированная модель плотности вероятностей возвышений морской поверхности, которая в области малых значений близка к модели Грама-Шарлье, а за пределами этой области стремится к распределению Гаусса. Сопоставление с данными натурных измерений статистических моментов, рассчитанных с помощью трёх типов моделей: модели Грама-Шарлье, Лиу и комбинированной модели показали преимущество последней для решения задачи восстановления статистических характеристик морской поверхности по данным альтиметрических измерений.

### Литература

1. *Brown G.S.* The average impulse response of a rough surface and its applications // IEEE Trans. Antennas Propagat. - 1977. - Vol. AP-25. - P. 67-74.
2. *Queffelec P.* Long-term validation of wave height measurements from altimeters // Marine Geodesy. 2004. Vol. 27. P. 495-510. DOI: 10.1080/01490410490883478.
3. *Gómez-Enri J., Gommenginger C.P., Srokosz M.A., Challenor P.G., Benveniste J.* Measuring global ocean wave skewness by retracking RA-2 Envisat waveforms // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2007. Vol. 24. P. 1102-1116.
4. *Rodriguez E.* Altimetry for non-Gaussian oceans: Height biases and estimation of parameters // J. of Geophys. Res. 1988. Vol. 93, № C11, P. 14,107-14,120.
5. *Liu Y., Yan X.-H., Liu W.T., Hwang P.A.* The probability density function of ocean surface slopes and its effects on radar backscatter // J. Physical. Oceanogr. 1997. Vol. 27. P. 782-797.
6. *Chapron B., Kerbaol V., Vandemark D., Elfouhaily T.* Importance of peakedness in sea slope measurements and applications // J. Geophys. Res. - 2000. - Vol. 105, № C7. P. 17195 - 17202.
7. *Huang N.E., Long S. R.* An experimental investigation of the surface elevation probability distribution and statistics of wind-generated waves // J. Fluid Mech. 1980. Vol. 101, № 1. P. 179-200.
8. *Заневалов А.С., Пустовойтенко В.В.* Моделирование плотности вероятностей уклонов морской поверхности в задачах рассеяния радиоволн // Известия вузов. Радиофизика. 2010. Vol. 53, № 2. С. 110-121.
9. *Hou Y., Song G., Zhao X., Song J., Zheng Q.* Statistical distribution of nonlinear random water wave surface elevation // Chinese J. of Oceanology and Limnology. 2006. Vol. 24, № 1. P. 1-5.
10. *Hayne G.S.* Radar altimeter mean return waveforms from near-normal-incidence ocean surface scattering // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1980. Vol. AP-28 P. 687-692.
11. *Кендалл М. Дж., Стьюарт А.* Теория распределений: Пер. с англ. - М.: Наука. 1966. 587 с

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОТОКОВ И ПЕРЕНОС ВЗВЕСИ В СИСТЕМАХ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ТЕЧЕНИЙ

А.А. Карпов, Б.И. Самолубов, И.А. Жаров

Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Приведены результаты исследований взаимодействия придонного потока с вышележащим струйным течением и математического моделирования переноса взвеси в системах течений. Выявлена параболическая зависимость расходов струйного и придонного стратифицированных потоков, входящих в 8 систем течений в водохранилищах и озерах с разными типами плотностного расслоения вод. Установлены связи параметров обнаруженной зависимости с характеристиками течений, отражающие эффекты взаимодействия потоков для всех рассмотренных систем. Показано, что определяющую роль в этих эффектах играет интегральная устойчивость стратификации по всей глубине водоема. Получено аналитическое представление функции взаимодействия течений и проверена возможность ее применения в расчетах рассмотренных систем потоков. Разработана и апробирована математическая модель переноса взвеси в системах течений с придонными плотностными, промежуточными и дрейфовыми потоками.

### ВВЕДЕНИЕ

Прогнозы распространения примесей в озерах, водохранилищах и прибрежных зонах морей могут быть достаточно эффективными лишь при учете влияния всех течений, развивающихся в водной толще от поверхности до дна. Взаимодействие этих потоков приводит к их объединению в систему приповерхностных дрейфовых, стоковых, струйных промежуточных и придонных стратифицированных течений. Изучение и разработка методов математического моделирования таких систем и переноса в них взвешенных и растворенных примесей требует проведения комплексных натурных и теоретических исследований энерго- и массообмена по всей глубине водоема в ходе плановых гидрофизических съемок на его акватории.

От интенсивности турбулентного обмена в толще потоков и от активности взаимодействия между ними зависит ход седиментации, донной эрозии, формирования донных отложений, появления облаков мутности и других процессов, связанных с переносом взвешенных частиц. Обзорный анализ показывает, что в публикациях по стратифицированным течениям практически отсутствуют данные о теоретическом описании переноса взвеси по всей глубине водоема при наличии в нем систем стратифицированных течений [1, 3, 5, 8, 9]. Исходя из этого, цели данной работы сводились к следующим.

1. Выявление закономерностей взаимодействия потоков в системах течений в водохранилищах и озерах с разными типами плотностного расслоения вод;
2. Установление связей параметров взаимодействия с характеристиками течений;
3. Получение аналитического представления функции взаимодействия потоков и проверка возможности ее применения в расчетах систем течений;
4. Построение математической модели диффузии взвеси в системах течений с учетом агрегации частиц и проверка этой модели по данным прямых измерений.

Закономерности взаимодействия потоков в системах течений

В данной работе представлены результаты натурных и теоретических исследований взаимодействия придонного плотностного потока с вышележащим струй-



ным течением. Измерения проводились на продольных разрезах в водохранилищах Нурекском (1978, 1982 гг.), Ивановском (1999 г.), Рузском (2000 г.), Вазузском (2002 г.), Истринском (2002 г.) и в Петрозаводской губе оз. Онежского (2007, 2008 гг.) [1, 2]. Применявшийся комплекс аппаратуры для структурных исследований параметров течений и состава воды, включавший различные зонды, градиентные установки и доплеровский профилограф течений, представлен в работах [1, 2]. Параметры течений на разрезах изменялись в следующих диапазонах: длина разреза 4.2-64.3 км, средняя скорость по всей толще воды 3-13 см/с, интегральное число Ричардсона для придонного потока 3-20 и для струйного течения 4-440, средние скорости струйного и придонного течений до 20 см/с.

Преобразование систем течений на разрезах включало слияние и разделение струйного и придонного потоков, бифуркации промежуточной (внутритермоклиной) струи, заглупление и подъем струйного течения при изменениях устойчивости стратификации и скорости ветра. Особый интерес представляют обнаруженные эффекты энергообмена между струйным и придонным потоками. На участках максимального роста толщины струи наблюдается увеличение уклона дна и сближение границ придонного и струйного течений. При сближении границ течений имеет место энергопередача от придонного потока к струйному и сопутствующее ей дополнительное утолщение струи. Такому процессу соответствует обратная пропорциональность удельных (на единицу ширины течения) расходов воды в струйном и придонном потоках, т.е. потеря расхода придонного потока приводит к увеличению расхода для струи и наоборот.

Однако такая взаимосвязь расходов воды в струйном и придонном течениях проявляется примерно в 40% случаев. Для остальных 60% рассмотренных течений имеет место прямая пропорциональность расходов воды в струйном и придонном потоках. Это может быть обусловлено следующими факторами:

- энергопереносом из струи в придонный поток при передаче энергии от дрейфового течения в глубинные;
- влиянием стокового течения в высокопроточных водоемах на оба потока (струйный и придонный);
- передачей импульса от струи, ускоряющейся при спуске по наклонной изопикнической поверхности. Это имеет место в случаях быстрого заглупления термоклины в направлении распространения течения за счет усиления ветра при интенсивном прогреве вод в эпилимнионе;
- переносом импульса от придонного потока к струе за счет вихреволнового обмена при снижении устойчивости плотностного течения.

Комплексный анализ результатов измерений на разных полигонах показал, что оба типа взаимосвязи расходов воды в придонном потоке и струе, движущейся над ним, проявляются на протяжении одного и того же разреза. При этом характер взаимодействия течений меняется в зависимости от их скоростей и устойчивости стратификации. Это следует из приведенных на рис. 1 – 3 примеров профилей скорости течения  $U$ , изменения плотности воды с глубиной от поверхности до дна  $\Delta\rho$  и зависимости расхода придонного потока  $(q_u)_{на}$  от расхода струи  $(q_j)_{на}$ . Здесь  $(q_u)_{на}$  и  $(q_j)_{на}$  – удельные (на единицу ширины потока) расходы  $q_u = \bar{U}z_u$  и

$q_j = 0,5U_{mj}\Delta z_j$ , нормированные на значения, средние для каждого разреза;  $\bar{U}$  – скорость придонного потока, средняя по его толщине  $z_u$ .

Изменение типа взаимодействия происходит при расходе струи, близком к среднему по длине течения (рис. 2). При меньших расходах струи значение  $(q_u)_{на}$  обратно пропорционально  $(q_j)_{на}$ , что соответствует ускорению одного течения за счет ослабления другого. Если расход струи больше среднего по длине течения, то наблюдается одновременное ускорение или замедление течений. Одно из ярких проявлений такого процесса наблюдалось нами в августе 2008 г. в Петрозаводской губе Онежского озера. При ускорении придонного потока под влиянием внутренней волны сейшевой природы имела место генерация завихренности и подъем возмущений скорости в промежуточную внутритермоклиновую струю. Это приводило к усилению струйного течения.

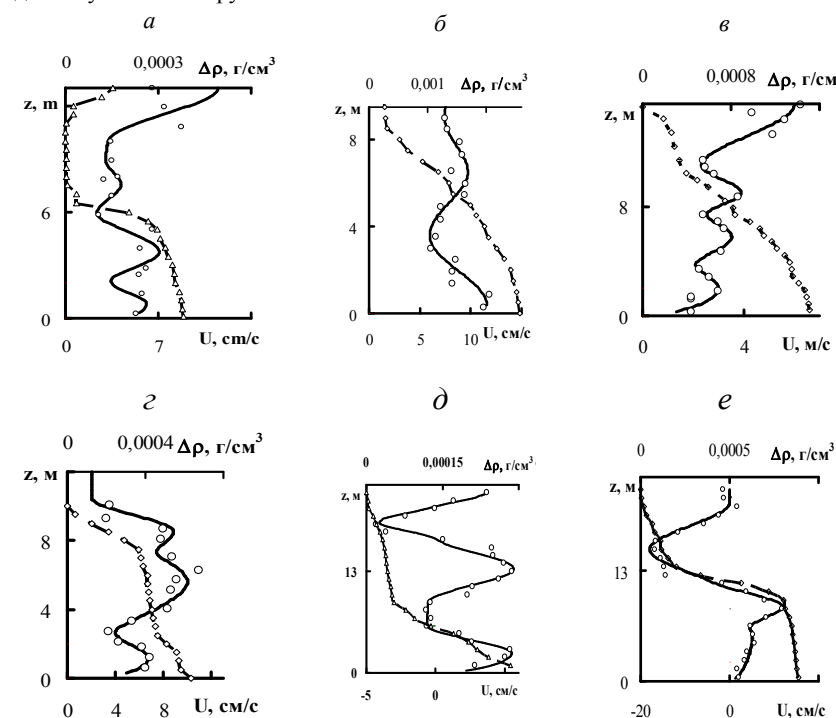


Рис. 1. Характерные профили скорости течения  $U$  и изменения плотности воды с глубиной  $\Delta\rho$  на разрезах на водохранилищах а – Рузском (28.06.2000), б – Истринском (18.07.2002), в – Вазузском (30.07.2002), г – Ивановском (21.07.1999), д, е – на озере Онежском (16.09.2007 и 11.08.2008).

Анализ связей выявленной параболической зависимости  $(q_u)_{на}$  от  $(q_j)_{на}$  с параметрами течения и состава воды показал, что определяющую роль в процессах взаимодействия придонного и струйного течений играет интегральная устойчи-

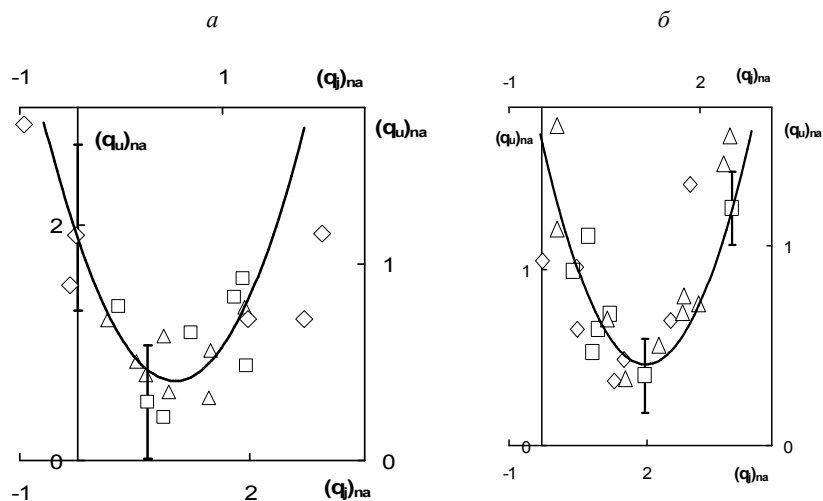


Рис. 2. Связь нормированных расходов придонного  $(q_u)_{na}$  и струйного  $(q_j)_{na}$  течений на разрезах а – в Иваньковском водохранилище (21.07.1999) и Онежском озере (16.09.2007 и 11.08.2008), б – в Рузском (28.06.2000), Истринском (18.07.2002) и Вазузском (27.07.2002) водохранилищах. Интервалы – погрешность определения расхода.

вость стратификации всей водной толщи. Эта устойчивость характеризуется интегральной частотой плавучести  $N_H = (g\delta\rho_H / \rho H)^{1/2}$ . Здесь  $\delta\rho_H = \rho|_{z=0,5M} - \rho|_{z=H-0,5M}$ .

С учетом влияния устойчивости стратификации для зависимости  $(q_u)_{na}$  от  $(q_j)_{na}$  найдено выражение вида

$$(q_u)_{na} = \left[ \left( \frac{N_H}{N_{Hmax}} \right)^2 + 0,4 \right] (q_j)_{na} \left[ (q_j)_{na} - 2(q_j)_{na}^* \right] + 2,5(q_j)_{na}^*, \quad (1)$$

где  $(q_j)_{na}^* = \left[ \left( \frac{N_H}{N_{Hmax}} \right)^2 + 0,4 \right] (q_j)_{na} \Big|_{q_u=(q_u)_{min}}$ ,  $(q_u)_{min}$  - минимальный на разрезе расход плотностного потока.

Результаты применения полученного выражения для расчета продольного распределения нормированного удельного расхода воды в придонном стратифицированном потоке по известному расходу промежуточной струи (рис. 3) свидетельствуют, что обнаруженная зависимость позволяет в основном правильно воспроизвести распределения, рассчитанные по данным измерений.

Отклонения от теоретических кривых, наблюдающиеся в отдельных точках на разрезах, связаны с влиянием внутренних волн, притоков и других эффектов, учет которых требует дальнейшего анализа процессов взаимодействия потоков, входящих в систему стратифицированных течений. Особое внимание необходимо

уделить выявлению закономерностей развития изучаемых процессов не только на разрезах вдоль по потоку, но и во времени.

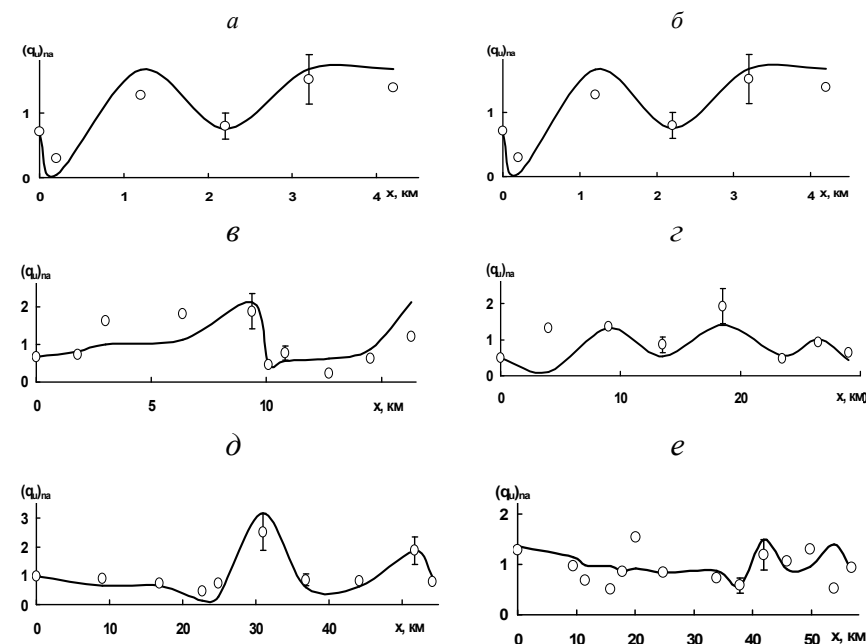


Рис. 3. Продольные распределения удельного (на ед. ширины) нормированного расхода воды плотностного течения, рассчитанные по данным измерений и по выражению (1) с учетом влияния промежуточной струи и устойчивости стратификации. Распределения соответствуют разрезам на водохранилищах а, б - Нурекском (21.09.1978, 11.10.1982), в - Истринском (18.07.2002), г - Рузском (28.06.2000), д - Вазузском (27.07.2002), е - Иваньковском (13.14.07.1999). Районы, в которых проводились измерения на разрезах, указаны в [1].

### Перенос взвеси в системах стратифицированных течений

Для расчета распределения концентрации взвеси при заданном распределении скорости течения  $U(x,z)$  применяется система уравнений диффузии и неразрывности вида

$$\partial_t S + U \partial_x S + (W - \omega_f) \partial_z S = -\partial_z (W' S') \quad (1)$$

$$\partial_x U + \partial_z W = 0 \quad (2)$$

В уравнении (1)  $U$  и  $W$  - продольная и вертикальная компоненты средней скорости течения,  $S$  - концентрация взвеси,  $S'$  - пульсации концентрации,  $W'$  - пульсация

вертикальной компоненты скорости течения,  $\omega_f = \sum_{i=1}^{\Phi_f} \omega_{fi} V_i$  - средневзвешенная

гидравлическая крупность (скорость гравитационного оседания) смеси частиц.

Здесь  $\omega_f$  и  $V_i$  - гидравлическая крупность и объемная концентрация частиц конкретной фракции,  $\Phi_{fr}$  - число фракций;  $\langle W'S' \rangle = -K_s \partial_z S$ , где  $K_s = K_u / Sc$  - коэффициент вертикального турбулентного обмена для взвеси,  $K_u$  - турбулентная вязкость,  $Sc$  - число Шмидта.

Уравнение (1) с учетом (2) в квазистационарном приближении интегрируется по  $z$  в пределах  $z_k \div H$ , где  $z_k \ll H$  - ближайший ко дну уровень регистрации концентрации  $S$ , с условиями у поверхности воды при  $z = H$  и у дна при  $z = z_k$ :

$$\partial_z S \Big|_{z=H} = 0, \quad K_s \partial_z S \Big|_{z=H} = 0, \quad S(H) = (S)_H, \quad W(H) = W_H, \quad S \Big|_{z=z_k} = S_k.$$

При интегрировании адвективного потока взвеси и определении коэффициента вертикального турбулентного обмена  $K_u$  применяются полуэмпирические выражения из [1, 2]. Выражение  $K_u = K_u(U, N, \ell)$  позволяет учесть влияние устойчивости стратификации на турбулентность, особенности переноса импульса на границах и в ядрах течений, а также профиль масштаба турбулентности от дна до поверхности. Здесь  $N = (g(-\partial_z \rho) / \rho)^{1/2}$  - частота плавучести,  $\ell$  - путь смешения.

В расчетах числа Шмидта  $Sc = 1 + \alpha_{sc} Ri_d$  по [4] значения  $\alpha_{sc}$  составляло 0,01. Здесь  $Ri_d = N^2 \ell^2 / (u_* + \sqrt{e_{fc}})^2$  - модифицированное число Ричардсона, которое, в отличие от обычного (градиентного), конечно в ядре потока с  $\partial_z U = 0$ ,  $u_*$  - сдвиговая скорость,  $e_{fc}$  - пропорциональное турбулентной энергии  $e$  значение  $\sigma_w^2$  в ядре течения.

Гидравлическая крупность определялась с применением полученного в данной работе выражения, позволяющего учесть эффект флокуляции (агрегации) частиц взвеси. Этому эффекту посвящен ряд публикаций, в которых отмечается важная роль и широкая распространенность этого явления [6, 7]. Отмечается увеличение размеров частиц взвеси в областях с повышенной гидродинамической устойчивостью стратифицированных течений. Подобное явление наблюдалось также в Нурекском водохранилище [1]. На основании анализа этих данных и результатов измерений на указанных выше четырех разрезах нами получено выражение  $\omega_f = \omega_f(H) + 2 \cdot 10^{-4} \cdot Ri_d$ . Значения  $\omega_f(H)$  оцениваются по формуле для гидравлической крупности взвеси из [1].

Проверка модели переноса взвеси проводилась по результатам, полученным экспедициями кафедры физики моря и вод суши в ходе исследований на Нурекском водохранилище (1980г) и на Онежском озере (2007, 2008гг). По итогам этого сопоставления теоретические распределения  $S$  удовлетворительно согласуются с измеренными, что следует из представленных графиков (рис. 1, 2). Здесь же показаны расчетные профили коэффициента турбулентного обмена и скорости.

Для системы течений с суспензионной стратификацией в Нурекском водохранилище (стоковое течение - струя - плотностной поток) соответствие теоретических и измеренных профилей концентрации взвеси существенно лучше, чем для системы термически стратифицированных течений в Онежском озере, со сгонно-нагонным течением и придонным плотностным потоком.

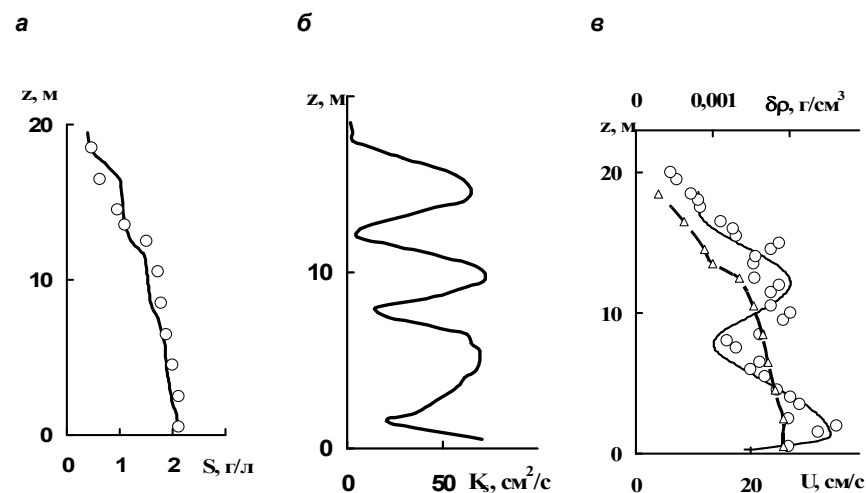


Рис. 1. Профили а – концентрации взвеси, б – коэффициента турбулентного обмена, в – скорости течения и изменения плотности воды с глубиной (пунктир). Точки соответствуют результатам измерений на разрезе в Нурекском водохранилище (16.08.1980). Сплошные кривые – теоретические.

Это объясняется сильным воздействием вихреволновых процессов, индуцированных внутренними сейшми, в период слабой стратификации в озере. Перечисленные факторы не учитываются в предлагаемой модели.

В целом предложенная модель оказалась эффективной для расчетов профилей концентрации взвеси при заданных распределениях скорости и плотности воды как для течений с суспензионной стратификацией, так и для термически стратифицированных потоков.

#### Основные результаты

1. Выявлена параболическая зависимость расходов струйного и придонного стратифицированных потоков, входящих в 8 систем течений в водохранилищах и озерах с разными типами плотностного расслоения вод.
2. Установлены связи параметров обнаруженной зависимости с характеристиками течений, отражающие эффекты взаимодействия потоков для всех рассмотренных систем. Показано, что определяющую роль в этих эффектах играет интегральная устойчивость стратификации по всей глубине водоема.
3. Получено аналитическое представление функции взаимодействия течений и проверена возможность ее применения в расчетах рассмотренных систем потоков.
4. Построена и проверена математическая модель диффузии взвеси в системах течений с учетом агрегации частиц.

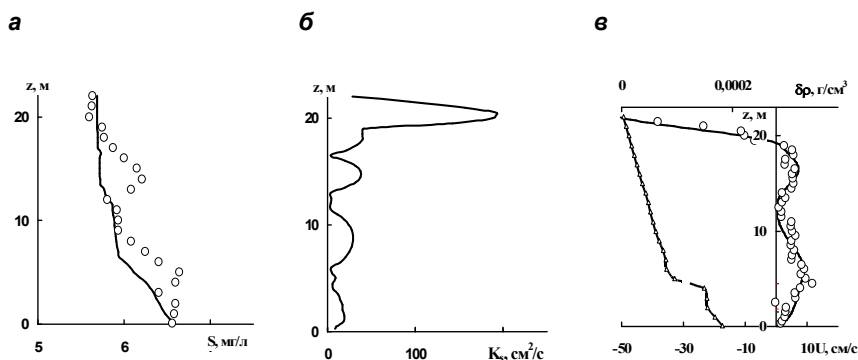


Рис. 2. Профили а – концентрации взвеси, б – коэффициента обмена, в – скорости и изменения плотности воды с глубиной (пунктир). Точки соответствуют результатам измерений на разрезе «Петрозаводской губе оз. Онежского (19.09.2007)». Кривые  $S$ ,  $K_s$  и  $U$  – теоретические.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 08-05-00574).

### Литература

1. Самолюбов Б. И. Плотностные течения и диффузия примесей. М.: Изд. ЛКИ. URSS. 2007. 352 с.
2. Самолюбов Б.И., Иванова И.Н. Влияние волновых процессов на структуру стратифицированных течений в заливе «Известия РАН. Серия физическая» 2010. № 12. С. 1770 – 1774.
3. Эдельштейн К.К. Водные массы долинных водохранилищ. М.: Изд. МГУ. 1991. 176 с.
4. Bowden K.F. Turbulent mixing in Estuaries // Ocean Management. 1981. V.6. № 2/3. P. 117 – 135.
5. De Cesare G., Boillat J.L. Intrusive and bottom density currents and induced vertical exchanges in a stratified lake // XXX IAHR Congress. ATh. Thessaloniki. Greece. 24-29 August 2003. V.1. THEME. C. P. 381 – 388.
6. Kranck K. Flocculation of suspended sediment in the sea. Nature. 1973. V. 246. P. 348-350.
7. MacIntyre S., Alldredge A. L. Accumulation of marine snow at density discontinuities in the water column // Limnol. Oceanogr., 34(4), 1995, V. 40(3). P. 449-468.
8. MacIntyre S., Flynn K. M., Jellison R., Romero J. R. Boundary mixing and nutrient fluxes in Mono Lake, California // Limnology and Oceanography. 1999. V. 44. №3. P. 512-529.
9. Michioku K. Hydrodynamics in Lakes and Reservoirs Res. & Practice in Hydraulic Engineering in Japan // Special Issue of JHNE SI-1. 1993.9. P. 17-39.

## ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ВДОЛЬСКЛОНОВОГО ПЛОТНОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ С ВЛОЖЕННОЙ МОДЕЛЬЮ РАСЧЕТА ВЯЗКОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ.

Килесо А.В., Гриценко В.А.

Российский государственный университет им. И.Канта

### Введение

Под придонными гравитационными течениями понимают потоки более тяжелой воды, распространяющейся по дну под слоем более легкой воды [6,9,10]. Их толщина колеблется от нескольких метров до нескольких сот метров, а характерная скорость их распространения по дну – от 2-3 см/с до полуметра в секунду и более [5,9-11,13,15-17]. Такого рода течения наблюдаются на шельфе моря Уэдделла [13], в районе Фареро-Исландского хребта [17], при распространении затоков североморских вод в Балтийском море [15], в крупных озерах и водохранилищах [9,10]. Хорошо известна роль придонных течений в процессе переноса и перетолжения взвеси [5,10,11,16]. Известно также, что воздействие плотностного течения на донные осадки возможно, по крайней мере, на уровне действия двух физических механизмов. Первый из них [4] возникает за счет несовпадения в пространстве в головной части плотностных течений высоко градиентных зон по массе и скорости (фронтальных разделов). Второй механизм связан с вязким взаимодействием водной массы течения с дном [5]. Ранее [2] было показано, что простое обнуление значения вдольсклоновой скорости на линии дна возможно только при достаточно малой величине шага расчетной сетки по вертикали. Однако практическая реализация модельных расчетов при выполнении достаточно жесткого ограничения на сеточное число Рейнольдса ( $Re_s < 2$ ) крайне затруднительна и во многих работах использовались условия скольжения и непротекания жидкости на дне [1-5,7].

Целью данной работы стала разработка новой модели, явно разрешающей процесс формирования вязкого пограничного слоя на дне для нестационарного вдольсклонового плотностного течения.

### Модель

В качестве базовой была использована численная модель придонного гравитационного течения [2,3]. В данной модели используются условия скольжения и непротекания на дне, что не позволяет в явном виде описывать процессы взаимодействия придонного течения с дном. Как оказалось [2], простое обнуление вдольсклоновой скорости на дне не всегда физически корректно.

В данной работе изложен один из вариантов учета вязкого прилипания на дне при помощи дополнительной под-модели, встраиваемой в базовую XZ-модель на вложенной сетке. Этот способ позволил без значительного увеличения размеров основной расчетной сетки и общего времени расчета дополнить базовую модель возможностью учета вязкого прилипания жидкости на твердом дне и механизма порождения завихренности на линии дна [1,12], что крайне важно для анализа процессов осаждения, переноса, ресуспензии донных осадков или взвеси в придонной области океана.

Базовая XZ-модель придонного гравитационного течения [2,3] имеет следующую систему уравнений:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} + v_T \Delta \omega, \quad \frac{d\rho}{dt} = D_T \Delta \rho, \quad \Delta \psi = \omega, \quad \frac{dc}{dt} = D_T \Delta c,$$

где  $\omega$  – завихренность,  $\psi$  – функция тока,  $\partial \psi / \partial z = u$ ,  $\partial \psi / \partial x = -w$ ,  $u$  и  $w$ , соответственно, горизонтальная и вертикальная компоненты скорости течения,  $g=982$  см/с<sup>2</sup>,  $\rho_0$  – плотность пресной воды, а  $\rho$  – соленой,  $v_T = v_0 + c v_{\text{ЭФ}}$ ,  $D_T = (Sc)^{-1} v_T$  – коэффициенты турбулентных вязкости и диффузии,  $Sc=2$ ,  $v_{\text{ЭФ}} = \sqrt{Re} \cdot v_0$ ,  $Re = u_0 h_0 / \nu_0$ , при  $t=0$  –  $v_{\text{ЭФ}}=0$ ;  $C$  – трассер водной массы течения,  $d/dt = \partial/\partial t + u \partial/\partial x + w \partial/\partial z$ . Конечно-разностные уравнения использованной в работе модели построены на сетках 1501x501 ( $\Delta x = \Delta z = 0.05$ ) по явной схеме с направленными разностями [8]. Значения характерных масштабов расчетных течений изменялись в диапазонах:  $\Delta \rho_0$  – от 0.0005 до 0.005 г/см<sup>3</sup>,  $h_0$  – от 1 до 1000 см,  $u_0$  – от 1 до 20 см/с,  $v_{\text{ЭФ}}$  – от 0.3 до 5.0 см<sup>2</sup>/с.

Дополнительная под-модель, реализующая условие вязкого прилипания жидкости на линии дна, строилась по следующей схеме. Предполагалось, что первый расчетный слой базовой модели вдольсклонового течения совпадает с внешней границей или несколько выше ее. К расчетной области базовой модели добавляется дополнительный набор слоев, на которых и происходил расчет пограничного слоя по обычной формуле [12]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = u_\infty \frac{\partial u_\infty}{\partial x} + \nu_T \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0,$$

где  $u_\infty$  – горизонтальная компонента скорости на нижнем слое внешней модели плотностного течения, а все остальные переменные имеют тот же смысл что и выше. На данном этапе работы предполагается так же, что массоперенос происходит вне зоны вязкого пограничного слоя и уравнение для переноса плотности не рассматривается.

Расчетная сетка вязкой подмодели строилась с шагом по оси  $Oz$  в 10 раз меньшим, чем в базовой модели. Дискретизация по горизонтальной оси  $Ox$  осталась та же. Скорость на границе между основным течением и пограничным слоем рассчитывалась, как среднее арифметическое скоростей на первом слое базовой модели и предпоследнем слое пограничного слоя.

Из-за существенно меньшего шага по оси  $Oz$  для вложенной вязкой подмодели потребовалась выполнить процедуру синхронизации по времени расчетных полей двух моделей. Для этого на каждый шаг по времени в базовой модели производилось 100 шагов в модели пограничного слоя.

На рис. 1 представлены результаты расчета распределений значений избыточной плотности для одной и той же фазы эволюции вдольсклонового течения на новой (а) и старой моделях (б).

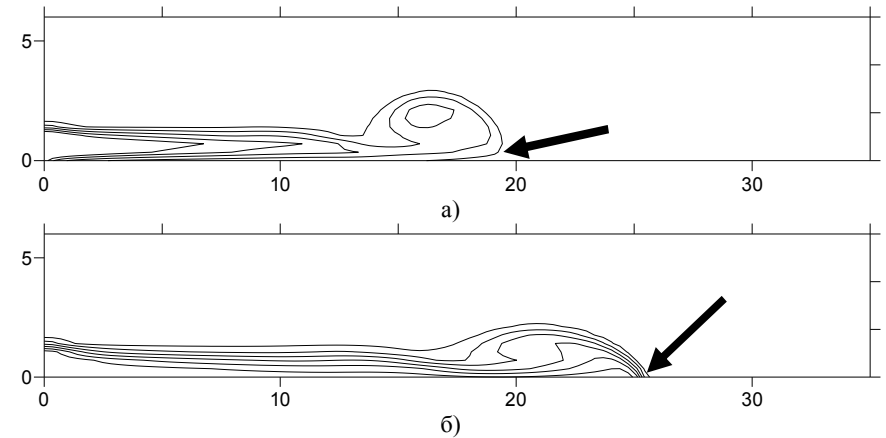


Рис. 1. Распределения значений изолиний избыточной плотности  $\sigma = (\rho - \rho_0) / \Delta \rho_0$  для одного из расчетных течений с условием вязкого прилипания на дне (а) и без него (б). Значения изолиний пробегают последовательно сверху вниз значения  $\sigma$  от 0.1 до 0.85 с шагом 0.15. Характерные параметры течения:  $\Delta \rho_0 = 0.0001$  г/см<sup>3</sup>,  $u_0 = 3$  см/с,  $v_{\text{ЭФ}} = 10^{-1}$  см<sup>2</sup>/с, уклон дна равен  $7^\circ$ , сетка 1501x501.

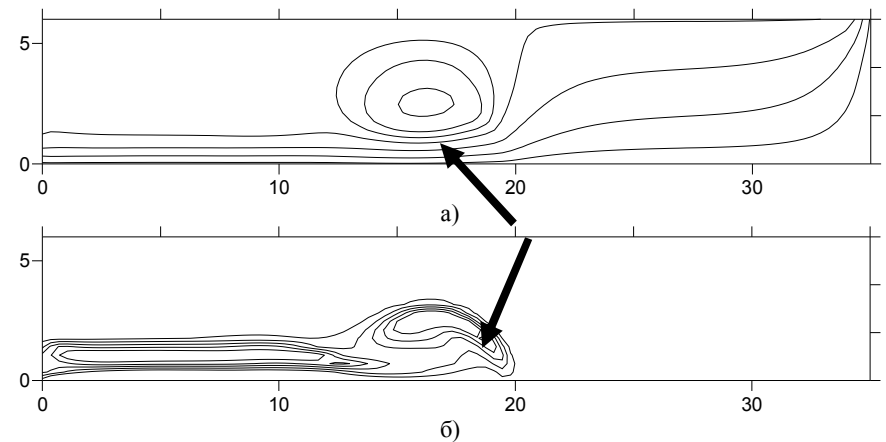


Рис. 2. Распределения значений функции тока (а) и завихренности (б) для одного из расчетных течений с условием вязкого прилипания на дне. Значения изолиний функции тока  $\Psi$  заключены от 0.1 до 1.7 с шагом 0.3 и завихренности  $\Omega$  – от -0.9 до -0.1 с шагом 0.2. Характерные параметры течения:  $\Delta \rho_0 = 0.001$  г/см<sup>3</sup>,  $u_0 = 3$  см/с,  $v_{\text{ЭФ}} = 10^{-1}$  см<sup>2</sup>/с, уклон дна равен  $7^\circ$ , сетка 1501x501.

Отчетливо видна разница в положении вершины головной части течений (на рисунке отмечены стрелочкой). Явный учет вязкого прилипания на дне «приподнял» вершину головы течения примерно на 1/5 толщины потока, что и наблюдается в лабораторных экспериментах и природе. Ранее данный эффект был достигнут за счет параметризации вязкого прилипания скорости на дне [1]. Очевидно, что явный учет прилипания жидкости на дне имеет более универсальный характер.

На рис. 2 приведены распределения функции тока и завихренности для той же фазы плотностного течения, рассчитанного на новой модели.

На рис. 3 приведен результат расчета вязкого напряжения  $\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial z}$  на линии дна для рассчитанного течения.

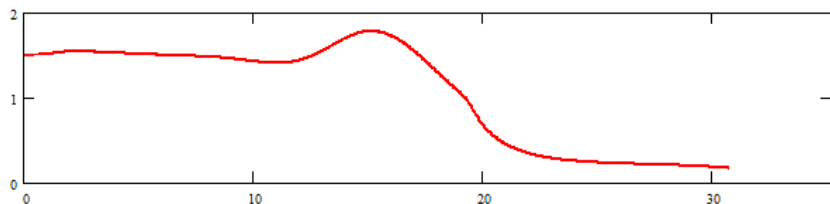


Рис. 3. График изменчивости вдоль линии дна касательного напряжения  $\tau$  для одного из расчетных течений с условием вязкого прилипания на дне. Характерные параметры течения:  $\Delta\rho_0=0.001 \text{ г/см}^3$ ,  $u_0=3 \text{ см/с}$ ,  $\nu_{\text{эфф}}=10^{-1} \text{ см}^2/\text{с}$ , уклон дна равен  $7^\circ$ , сетка  $1501 \times 501$ .

График касательного напряжения показывает, наличие существенного перепада величины вязких касательных напряжений на линии дна. В головной части течения наблюдается резкое возрастание касательного напряжения, что может способствовать более интенсивной ресуспензии донных осадков или вовлечению взвеси именно в этой части течения.

### Выводы

Анализ результатов расчетов на новой модели распространения вдольсклоновых плотностных течений показал удовлетворительную работоспособность предложенного алгоритма учета условия вязкого прилипания жидкости на дне. Полученная возможность расчета дополнительных параметров течения - например, вязких касательных напряжений на дне существенно расширяет возможности использования модели, особенно, в задачах расчета переноса и переотложения взвеси. В дальнейшем предполагается дополнить построенную модель **b-ε** моделью турбулентности для водной массы плотностного течения вне зоны вязкого погранслоя на линии дна.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 09-05-00446а.

### Литература

1. Анучин В.Н., Гриценко В.А. О форме фронта придонного гравитационного течения // *Океанология*. 1988. Т. 28. №2. С. 218-221.

2. Гриценко В.А., Юрова А.А. О распространении придонного гравитационного течения по крутому склону дна // *Океанология*. 1997. Т. 37. № 1. С. 44-49.
3. Гриценко В.А., Юрова А.А. Об основных фазах отрыва придонного гравитационного течения от склона дна // *Океанология*. 1999. Т. 39. №2. С. 187-191.
4. Гриценко В.А., Чубаренко И.П. Об особенностях структуры фронтальной зоны придонных гравитационных течений // *Океанология*. 2010. № 1. С. 26-32.
5. Емельянов Е.М., Гриценко В.А. Придонные течения в центральной Балтике по геологическим данным // *Океанология*. 1999. Т. 39. № 5. С. 776-786.
6. Жмур В.В., Сапов Д.А., Нечаев И.Д., Рыжаков М.В., Григорьева Ю.В. Интенсивные гравитационные течения в придонном слое океана // *Изв. АН. Сер. физическая*. 2002. Т. 66. № 12. С. 1721-1726.
7. Зацепин А.Г., Гриценко В.А., Кременецкий В.В., Поляков С.Г., Строганов О.Ю. Лабораторное и численное исследование процесса распространения плотностных течений по склону дна // *Океанология*. 2005. Т. 45. № 1. С. 5-15.
8. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: МИР. 1980. 616 с.
9. Самолубов Б.И. Придонные стратифицированные течения. М.: Научный мир, 1999. 464 с.
10. Самолубов Б.И. Плотностные течения и диффузия примесей. М.: Из-во ЛКИ, 2007. 352 с.
11. Свиридов Н.И. Статистический анализ эрозионно-аккумулятивных процессов в Готландской впадине Балтийского моря // *Океанология*. 2003. Т. 43. № 6. С. 935-947.
12. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука. 1974. 711 с.
13. Carmack E.C., Foster T.D. On the flow of water out of the Weddell Sea // *Deep-Sea Res.* 1975. V. 22. 11. PP. 711-724.
14. Gritsenko V.A., Kilesa A.V., Kortishko V.V., Shishova A.V. The specific features of the entrainment and mixing processes in the downslope density currents // *International Conference "Fluxes and Structures in Fluids: Physics of Geospheres - 2009"*. Selected Papers. Ed. Yuli D. Chashechkin, Vasily G. Baydulov. IPM RAS. M. 2010. P. 159-168.
15. Nehring D., Matthaus W. Die hydrographisch-chemischen Bedingungen in der westlichen und zentralen Ostsee im Jahre 1991 // *Deutsche hydrographische Zeitschrift* 44, Jg. 1991/92. H. 5/6, S.217-238.
16. Simpson J.E. Gravity currents in the environment and the laboratory. England. ELLIS HORWOOD LTD. 1987. 244 p.
17. Steele J.H. Current measurements on the Iceland-Faroe Ridge // *Deep-Sea Res.* 1967. V. 14. P. 4. P.469-473.

К ВОПРОСУ О ЗАМЕНЕ СИЛОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭКВИВАЛЕНТНЫМИ  
МАССОВЫМИ В ЗАДАЧАХ ГИДРОДИНАМИКИ

А.В. Кистович

ИПМех РАН им. А.Ю. Ишлинского,  
МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет

Как известно, возникновение течений в жидкости определяется действием в ней источников возмущений исходного равновесного состояния. По своему происхождению эти источники делятся на два типа: силовые и массовые. В последнее время при решении задач о генерации возмущений в жидкости возникло целое направление, практикующее при математическом моделировании процесса использовать только массовые источники, мотивируя это тем, что силовые источники могут быть заменены эквивалентными массовыми. Ярким примером такого похода является работа [1], равно как и иные работы этого известного автора. Например, “дышащая” сфера (сфера с фиксированным центром, радиус которой колеблется по гармоническому закону вокруг среднего положения) заменяется массовым монополюсом, в то время как “вибрирующая” сфера (сфера постоянного радиуса, центр масс которой совершает колебания относительно среднего положения) представляется в виде массового диполя.

Строгий подход к решению подобных задач требует задания граничных условий на поверхностях тел, возмущающих исходное состояние жидкости. Однако это приводит к серьезным трудностям в связи с тем, что условия ставятся на движущихся поверхностях. При этом на поверхности нужно задать все физические поля задачи, что, например, для давления затруднительно. В этом случае замена истинного источника возмущений на его “суррогат” в виде силового или массового источников позволяет избежать этой проблемы и для линейных задач строить решения на основе метода функции Грина. Такой подход известен и в определенных случаях позволяет достигнуть разумных результатов. Но при этом, в отличие от [1], не делается никакого уклона в сторону массовых источников. Так движение в вязкой среде твердой плоскости вдоль себя самой, равно как и вращение цилиндра вокруг продольной оси симметрии, естественно воспринимать как воздействие силовых источников, образующихся на поверхности контакта с жидкостью, а не как действие массовых источников. Однако в [1] и других работах этого автора возможность описания движения только на основе массовых источников возводится в принцип, основанный на некоторой эквивалентной замене силовых источников массовыми.

Целью данной работы является демонстрация невозможности такой замены в общем случае.

Рассматривается неограниченная сжимаемая невязкая неоднородная изотермическая среда, термодинамические характеристики которой (частота плавуности и скорость звука) являются функциями глубины. В общем случае движение такой среды описывается уравнениями Эйлера, непрерывности и состояния

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = m, \quad \rho = \rho(p, S) \quad (1)$$

где  $\mathbf{v}$  – поле скорости;  $p$ ,  $\rho$  – полное давление и плотность;  $S$  – солёность (в промилле), определяемая как отношение массы соли к килограмму растворителя (чистая вода);  $\mathbf{g}$  – вектор гравитационного ускорения, направленный против оси  $z$ ;  $\mathbf{f}$  и  $m$  – силовые и массовые источники.

Поскольку в уравнение состояния входит солёность, систему (1) необходимо дополнить уравнением переноса соли. Так как реальные природные водоёмы характеризуются малыми значениями солёности ( $S < 40 \text{ ‰}$ ), с хорошим приближением допустима запись уравнения переноса соли в форме

$$\frac{\partial (\rho S)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho S \mathbf{v}) = k \rho \Delta S + m_S. \quad (2)$$

Здесь  $k$  – коэффициент диффузии соли,  $m_S$  – массовые источники соли. При этом массовые источники  $m$ , входящие в уравнение непрерывности определяются в виде суммы  $m = m_S + m_W$ , где  $m_W$  – массовые источники чистой воды.

Полные плотность и давление в среде задаются соотношениями

$$\rho = \rho_0(z) + \tilde{\rho}, \quad p = -g \int_{z_0}^z \rho_0(\zeta) d\zeta + \tilde{p}, \quad (3)$$

в которых  $\rho_0(z)$  – распределение стратифицирующей плотности;  $\tilde{\rho}$ ,  $\tilde{p}$  – возмущения плотности и давления.

Подстановка уравнения состояния в уравнение непрерывности с использованием уравнения переноса (2) приводит к соотношению

$$\nabla \cdot \mathbf{v} + \frac{1}{\rho c^2} \left( \frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla p \right) = -\beta k \Delta S + \frac{m_S (1 + \beta S_*) + m_W}{\rho} \quad (4)$$

которое играет роль дифференциального аналога уравнения состояния.

В (4)  $c(z) = (\partial \rho / \partial p)_{S,T}^{-1/2}$  – скорость звука,  $\beta = (\partial \rho / \partial S)_{p,T} / \rho$  – коэффициент солевого сжатия,  $S_*$  – солёность массовых источников.

Пренебрежение процессами диффузии в задачах излучения и распространения волн, учет малости величины  $\beta S_*$  по сравнению с единицей и линеаризация уравнений, основанная на малости возмущений плотности и давления по сравнению с их невозмущенными значениями, позволяют свести систему уравнений движения среды к приближенному виду

$$p'_t = -\rho_0 c^2 \nabla \cdot \mathbf{v} + \rho_0 g w + m c^2 \\ \rho_0 \mathbf{v}'_t = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}, \quad \rho'_t + \nabla \cdot (\rho_0 \mathbf{v}) = m \quad (5)$$

Здесь и в дальнейшем знак тильды у возмущений давления и плотности опускается для краткости записи.

Вопрос о возможности эквивалентной замены силовых источников массовыми сводится к следующей задаче: Пусть движения в среде порождаются только силовыми источниками ( $\mathbf{f} \neq 0$ ,  $m = 0$ ). Эти движения описываются набором со-



ответствующих физических полей  $p$ ,  $\rho$  и  $\mathbf{v}$ , определяемых как решение системы (5). Необходимо найти такое распределение массовых источников, чтобы при отсутствии силовых, то есть в ситуации ( $\mathbf{f} = 0$ ,  $m \neq 0$ ), набор физических полей не изменялся.

Для решения поставленной задачи необходимо предварительно, исходя из системы (5) для ситуации общего положения ( $\mathbf{f} \neq 0$ ,  $m \neq 0$ ), вывести отдельные уравнения для каждого физического поля. Для облегчения этой процедуры вводится вектор плотности импульса, определяемый выражением

$$\mathbf{q} = \rho_0(z) \mathbf{v} = \alpha \mathbf{e}_x + \beta \mathbf{e}_y + \gamma \mathbf{e}_z \quad (6)$$

в результате чего система (5) после исключения из неё плотности переписывается в покомпонентном виде

$$\begin{aligned} \alpha'_t &= -p'_x + f_x, & \beta'_t &= -p'_y + f_y \\ \gamma''_{tt} &= -p''_{zt} + g(\alpha'_x + \beta'_y + \gamma'_z - m) + \partial f_z / \partial t \\ p'_i &= -c^2(\alpha'_x + \beta'_y + \gamma'_z) - \frac{c^2 N_c^2}{g} \gamma + mc^2 \end{aligned} \quad (7)$$

где  $N_c^2 = N^2 - \frac{g^2}{c^2}$ ,  $N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho_0}{dz}$  – частота плавучести.

Исключение горизонтальных компонент  $\alpha$  и  $\beta$  вектора плотности импульса редуцирует (7) к форме

$$\begin{aligned} \widehat{L} \Gamma + \frac{g}{c^2} p''_{tt} + p'''_{ztt} &= \frac{\partial^2 f_z}{\partial t^2} \quad (A) \\ \frac{N_c^2}{g} \Gamma + \Gamma'_z + \frac{1}{c^2} p''_{tt} - \Delta_{\perp} p &= -\nabla_{\perp} \cdot \mathbf{f} + m'_t \quad (B) \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь введены обозначения

$$\widehat{L} = N_c^2 + \frac{\partial^2}{\partial t^2}, \quad \Gamma = \gamma'_t, \quad \Delta_{\perp} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad \nabla_{\perp} = \mathbf{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{e}_y \frac{\partial}{\partial y}.$$

Комбинация уравнений системы (8) вида

$$\widehat{L}^2(B) + \left[ \frac{d N_c^2}{dz} - \widehat{L} \left( \frac{N_c^2}{g} + \frac{\partial}{\partial z} \right) \right] (A)$$

позволяет избавиться от переменной  $\Gamma$  и получить уравнение для возмущений  $p$  давления:

$$\begin{aligned} \widehat{L}^2 \Delta p - N_c^2 \widehat{L} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \left( \varepsilon(z) \frac{g^2}{c^2} + 2NN'_z - \frac{N^2}{g} \widehat{L} \right) \frac{\partial^3 p}{\partial z \partial t^2} - \\ - \frac{1}{c^2} \left( \varepsilon(z) g \left( N^2 + \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) + 2gNN'_z + \widehat{L} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \\ = \widehat{L}^2 \mathfrak{R} - \left( \varepsilon(z) \frac{g^2}{c^2} + 2NN'_z - \widehat{L} \left( \frac{N_c^2}{g} + \frac{\partial}{\partial z} \right) \right) \frac{\partial^2 f_z}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (9)$$

где введены обозначения  $\varepsilon(z) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial c^2}{\partial z}$ ,  $\mathfrak{R} = \nabla_{\perp} \cdot \mathbf{f} - m'_t$ .

Для получения уравнения для вертикальной компоненты  $\gamma$  плотности импульса используется другая комбинация

$$\left[ \varepsilon c^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \widehat{S} \left( g + c^2 \frac{\partial}{\partial z} \right) \right] \frac{\partial^2}{\partial t^2} (B) - \widehat{S}^2 (A)$$

где  $\widehat{S} = \frac{\partial^2}{\partial t^2} - c^2 \Delta_{\perp}$ , так что искомое уравнение имеет вид

$$\begin{aligned} \widehat{S} \left( \frac{\partial^4 \gamma}{\partial t^4} - c^2 \Delta \frac{\partial^2 \gamma}{\partial t^2} - c^2 N_c^2 \Delta_{\perp} \gamma - \frac{c^2}{g} \left( N^2 \frac{\partial}{\partial z} + \frac{d N_c^2}{dz} \right) \frac{\partial^2 \gamma}{\partial t^2} \right) - \\ - c^2 \varepsilon(z) \left( \frac{N_c^2}{g} + \frac{\partial}{\partial z} \right) \frac{\partial^4 \gamma}{\partial t^4} = \\ = \frac{\partial}{\partial t} \left[ c^2 \varepsilon(z) \mathfrak{R}''_{tt} + \widehat{S} (c^2 \mathfrak{R}'_z + g \mathfrak{R}) + \widehat{S}^2 f_z \right] \end{aligned} \quad (10)$$

Последовательные действия по исключению из системы (7) давления и вертикальной компоненты плотности импульса приводят к уравнениям для горизонтальных компонент  $\alpha$  и  $\beta$ :

$$\begin{aligned} \widehat{H} \Delta_{\perp} \alpha'_t &= \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} (F - \widehat{L}^2 c^2 \Delta_{\perp} m) + \widehat{H} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial f_y}{\partial x} - \frac{\partial f_x}{\partial y} \right) \\ \widehat{H} \Delta_{\perp} \beta'_t &= \frac{\partial^2}{\partial y \partial t} (F - \widehat{L}^2 c^2 \Delta_{\perp} m) + \widehat{H} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial f_x}{\partial y} - \frac{\partial f_y}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

где оператор  $\widehat{H}$  определяется выражением

$$\widehat{H} = \widehat{L}^2 \widehat{S} + \left[ \varepsilon L + \frac{d N_c^2}{dz} - L \left( \frac{N_c^2}{g} + \frac{\partial}{\partial z} \right) \right] \left( c^2 \frac{\partial}{\partial z} + g \right) \frac{\partial^2}{\partial t^2}$$

а функция  $F$  – соотношением

$$F = \tilde{L}^2 \frac{\partial}{\partial t} \nabla_{\perp} \cdot \mathbf{f} + \frac{\partial}{\partial t} \left[ \varepsilon L + \frac{d N_c^2}{d z} - L \left( \frac{N_c^2}{g} + \frac{\partial}{\partial z} \right) \right] \left[ \left( c^2 \frac{\partial}{\partial z} + g \right) \nabla_{\perp} \cdot \mathbf{f} - c^2 \Delta_{\perp} f_z \right] \quad (12)$$

Теперь, опираясь на уравнения (9 – 12) можно рассмотреть вопрос о возможности эквивалентной замены силовых источников массовыми. Поскольку рассматривается линейная задача, то допустимо последовательное исследование такой возможности для трёх возможных вариантов силовых источников:  $f_x = f_y = 0, f_z \neq 0$ ,  $f_x = f_z = 0, f_y \neq 0$  и  $f_y = f_z = 0, f_x \neq 0$ .

В первом случае,  $f_x = f_y = 0, f_z \neq 0$ , из правых частей уравнений (9 – 11) следует, что такая замена возможна при выполнении условий

$$\begin{aligned} \tilde{L}^2 m &= \left( \varepsilon \frac{g^2}{c^2} + \frac{d N^2}{d z} - \tilde{L} \left( \frac{N_c^2}{g} + \frac{\partial}{\partial z} \right) \right) \frac{\partial f_z}{\partial t} \\ \varepsilon c^2 m''' + \tilde{S} (c^2 m''_{iz} + g m'_i) &= -\tilde{S}^2 f_z \\ L^2 c^2 m &= \frac{\partial}{\partial t} \left[ \varepsilon L + \frac{d N_c^2}{d z} - L \left( \frac{N_c^2}{g} + \frac{\partial}{\partial z} \right) \right] (c^2 f_z) \end{aligned} \quad (13)$$

Комбинация уравнений системы (13), при котором из них исключается переменная  $m$ , приводит не к тождествам (что означало бы возможность эквивалентной замены), а к условиям совместности (что означает в общем случае невозможность такой замены) в виде уравнений, которым должен удовлетворять вертикальный силовой источник:

$$\left\{ \tilde{L}^2 [\tilde{A} \tilde{B} + \tilde{L}^2 \tilde{S}^2] - c^2 \frac{d N_c^2}{d z} \tilde{S} \tilde{B} \right\} f_z = 0, \quad \varepsilon f_z = 0, \quad f_z \neq 0 \quad (14)$$

где введены обозначения операторов

$$\tilde{A} = \varepsilon c^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \tilde{S} \left( c^2 \frac{\partial}{\partial z} + g \right), \quad \tilde{B} = \left[ \varepsilon \frac{g^2}{c^2} + \frac{d N^2}{d z} - \tilde{L} \left( \frac{N_c^2}{g} + \frac{\partial}{\partial z} \right) \right] \frac{\partial^2}{\partial t^2} \quad (15)$$

Таким образом, возможность замены силового источника, порождающего вертикальную компоненту силы, массовым возможно лишь в том случае, если скорость звука в среде постоянна ( $\varepsilon = 0$ , что с необходимостью следует из второго уравнения системы (14)), а функция источника вертикальной компоненты удовлетворяет первому уравнению (14).

Для того чтобы осмыслить значение этого уравнения полезно упростить его, рассмотрев предельный случай, когда частота плавучести  $N$  также постоянна в среде. В результате такого упрощения (14) приобретает вид

$$\tilde{S} \tilde{L} \left[ \frac{\partial^4}{\partial t^4} - c^2 \Delta \frac{\partial^2}{\partial t^2} - c^2 N_c^2 \Delta_{\perp} - \frac{N^2 c^2}{g} \frac{\partial^3}{\partial z \partial t^2} \right] f_z = 0 \quad (16)$$

из которого следует, что излучение вертикальной компоненты силы должно быть либо в виде волны источников, бегущей в горизонтальном направлении со скоростью звука (оператор  $\tilde{S}$ ), либо заполняющем всё пространство колебанием во времени с частотой  $N_c$  гибридных акустико-гравитационных волн (оператор  $\tilde{L}$ ), либо представлять собой волну источников, распространяющихся в пространстве подобно гибридной акустико-гравитационной волне (последний оператор в квадратных скобках).

Видно, что все эти возможные виды распределений источников вертикальной компоненты силы физически не реализуемы, что только усиливает сделанное ранее заключение о невозможности в общем случае замены источника вертикальной силы эквивалентным массовым источником.

Во втором случае,  $f_x = f_z = 0, f_y \neq 0$ , в уравнениях (9, 10) правая часть остаётся неизменной, если справедливо соотношение

$$\frac{\partial f_y}{\partial y} = -m'_i \quad (17)$$

а из инвариантности правых частей уравнений системы (11) следует

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} (\tilde{F} + \tilde{L}^2 c^2 \Delta_{\perp} m) + \tilde{H} \frac{\partial^2 f_y}{\partial x \partial y} &= 0 \\ \frac{\partial^2}{\partial y \partial t} (\tilde{F} + \tilde{L}^2 c^2 \Delta_{\perp} m) - \tilde{H} \frac{\partial^2 f_y}{\partial x^2} &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

где  $\tilde{F} = F(f_x = f_z = 0)$ .

Из (18) следует условие совместности

$$\tilde{H} \Delta_{\perp} \frac{\partial f_y}{\partial x} = 0 \quad (19)$$

которое указывает в общем случае на невозможность замены силового источника, действующего вдоль оси  $y$  на эквивалентный массовый источник.

Аналогичные результаты

$$\frac{\partial f_x}{\partial x} = -m'_i, \quad \tilde{H} \Delta_{\perp} \frac{\partial f_x}{\partial y} = 0 \quad (20)$$

имеют место и для силового источника, действующего вдоль оси  $x$ .

В предельном случае среды с постоянными термодинамическими характеристиками условия совместности (19, 20) приобретают вид, аналогичный (16):

$$\tilde{S} \tilde{L} \left[ \frac{\partial^4}{\partial t^4} - c^2 \Delta \frac{\partial^2}{\partial t^2} - c^2 N_c^2 \Delta_{\perp} - \frac{N^2 c^2}{g} \frac{\partial^3}{\partial z \partial t^2} \right] \Delta_{\perp} \left\{ \frac{\partial f_x / \partial y}{\partial f_y / \partial x} \right\} = 0 \quad (21)$$

Одновременно с проблемой возникновения условий совместности, налагаемых на вид силовых источников, возникает проблема интегрируемости соотношений, определяющих вид массовых источников  $m$  при выполнении условий совме-

стности. Простейший пример – задача интегрирования соотношения (17), если интенсивность силового источника неизменна вдоль оси  $y$ . В этом случае  $\partial f_y / \partial y = 0$  и возникает проблема, как проинтегрировать уравнение  $m'_t = 0$ ?

Особенно ярко невозможность замены силовых источников массовыми проявляется в модели несжимаемой жидкости, когда скорость звука  $c$  полагается равной бесконечности. В этом случае первое уравнение системы (5) редуцируется к виду

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = \frac{m}{\rho_0} \quad (22)$$

При наличии в среде только силовых источников уравнение (22) имеет очевидный вид

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (23)$$

При замене силовых источников массовыми (если бы такая замена была бы возможна), уравнение (23) заменится на (22), причем  $m \neq 0$ . Поскольку физические поля при эквивалентной замене не меняются, в уравнениях (22, 23) фигурирует одно и то же поле скорости, которое должно одновременно удовлетворять двум взаимоисключающим условиям

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{v} \neq 0 \quad (24)$$

И, наконец, еще один пример ложности идеи пересчета силовых источников в массовые. Пусть жидкость заключена в ограниченный объем и, следовательно, имеет конечную массу. Распределение силовых источников таково, что выполняются соотношения  $f_x = f_z = 0$ ,  $f_y \neq 0$ ,  $\partial f_y / \partial y = A > 0$ , где  $A$  – постоянная величина. Тогда из (17) следует

$$m'_t = -A < 0 \quad (25)$$

то есть расход массового источника постоянно уменьшается и какой-то момент становится отрицательным, сохраняя свой знак все последующее время. В результате существует конечный момент времени, при достижении которого среда просто исчезнет из ограниченного объема, чего не может быть при наличии в среде только силовых источников.

Всё вышесказанное указывает на то, что замена силовых источников эквивалентными массовыми источниками не достижима ни при каких обстоятельствах.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 08-01-00562).*

### Литература

1. B. Voisin. Limit states of internal waves beams. Journal of Fluid Mechanics, 2003, V. 496, pp. 243–293.

## ИНТЕГРАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

А.В. Кистович

*ИПМех РАН им. А.Ю. Ишлинского,  
МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет*

Проблеме описания поверхностных волн посвящено большое количество работ, в которых исследование поставленных задач проводится путем различных математических методов. Одним из походов, впервые появившимся в [1], является метод описания поверхностного волнения на основе интегрального уравнения, задающего связь между характеристиками волны и известного как уравнение А.И. Некрасова. В то же время, полученное в [1] уравнение ограничивает класс возможных решений установившимися волнами, обладающими зеркальной симметрией относительно вертикальных сечений, проходящих через любой максимум и минимум возвышения поверхности. В работе [2] было получено интегральное уравнение, описывающее распространение установившихся волн при отказе от каких-либо ограничений на их форму. Различные интегро-дифференциальные описания поверхностных волн более широкого класса, в том числе и неустановившихся, приведены в [3, 4]. В данной работе предлагается новая система дифференциальных и интегральных соотношений, описывающее распространение потенциальных поверхностных волн, в общем случае неустановившихся.

**Постановка задачи.** Рассматривается распространение двумерных потенциальных волн на поверхности однородной идеальной несжимаемой жидкости глубиной  $h$ . Анализируемая система включает уравнения Эйлера, неразрывности и условие потенциальности со стандартными граничными условиями на взволнованной поверхности и плоском дне [5]

$$\begin{aligned} u'_t + uu'_x + wu'_z &= -p'_x - g\zeta'_x, & w'_t + uw'_x + ww'_z &= -p'_z \\ u'_x + w'_z &= 0, & u'_z - w'_x &= 0 \\ p|_{z=\zeta} &= 0, & w - u\zeta'_x|_{z=\zeta} &= \zeta'_t, & w|_{z=-h} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $x, z, t$  – декартовы координаты и время;  $v_x = u$ ,  $v_z = w$  – компоненты безвихревого поля скорости жидкости  $\mathbf{v}$ ; функция  $\zeta$  задает форму свободной поверхности;  $p$  – порожденное волной возмущение давления, нормированное на плотность жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения. Штрихом обозначены производные по переменной, указанной нижним индексом.

Введение потенциала  $\varphi$  ( $u = \varphi'_x$ ,  $w = \varphi'_z$ ) позволяет проинтегрировать уравнения Эйлера

$$p = -\varphi'_t - (\varphi'^2_x + \varphi'^2_z)/2 - g\zeta \quad (2)$$

и редуцировать исходную задачу к виду

$$\varphi''_{xx} + \varphi''_{zz} = 0$$

$$\varphi'_t + (\varphi'^2_x + \varphi'^2_z)/2 \Big|_{z=\zeta} = -g\zeta, \quad \varphi'_z - \varphi'_x \zeta'_x \Big|_{z=\zeta} = -\zeta'_t, \quad \varphi'_z \Big|_{z=-h} = 0 \quad (3)$$

В соотношении (2) постоянная интегрирования положена равной нулю, поскольку при отсутствии волнения ( $\zeta = 0$ ,  $\varphi = 0$ ) возмущения давления за счет поверхностной волны также должны быть равны нулю.

Следуя идеологии, развитой в [2], потенциал  $\varphi$  вблизи поверхности  $z = \zeta(x, t)$  представляется в виде разложения

$$\varphi = \Phi_0(x, t) + \Phi_1(x, t)(z - \zeta) + \Phi_2(x, t)(z - \zeta)^2 + \Phi_3(x, t)(z - \zeta)^3 + \dots \quad (4)$$

подстановка которого в уравнение Лапласа системы (3) приводит к последовательности соотношений

$$\Phi_n = \frac{1}{n} \frac{\Phi_{n-1} \zeta''_{xx} + 2\Phi'_{n-1} \zeta'_x - \Phi''_{n-2} / (n-1)}{1 + \zeta'^2_x}, \quad n \geq 2 \quad (5)$$

Подстановка (4) в кинематическое граничное условие системы (3) на свободной поверхности порождает связь

$$\Phi_1 = \frac{\Phi_0 \zeta'_x + \zeta'_t}{1 + \zeta'^2_x} \quad (6)$$

а из динамического граничного условия, с учетом (6), получается уравнение для функции  $\Phi_0$

$$\frac{\partial \Phi_0}{\partial t} (1 + \zeta'^2_x) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \Phi_0}{\partial x} \right)^2 - \frac{\partial \Phi_0}{\partial x} \zeta'_x \zeta'_t - \frac{1}{2} \zeta'^2_t + g\zeta (1 + \zeta'^2_x) = 0 \quad (7)$$

Таким образом, система (3) свелась к задаче определения такого потенциала  $\varphi$ , который удовлетворяет уравнениям

$$\varphi''_{xx} + \varphi''_{zz} = 0, \quad \varphi'_z \Big|_{z=-h} = 0, \quad (8)$$

и вблизи поверхности  $z = \zeta(x, t)$  подчиняется соотношениям (4–7).

Как следует из (8), искомый потенциал представим в виде [6]

$$\varphi(x, z, t) = \int_0^{\infty} \frac{\text{ch}(k(z+h))}{\text{ch}(kh)} (A(k, t) \cos(kx) + B(k, t) \sin(kx)) dk \quad (9)$$

Разложение (9) вблизи поверхности  $z = \zeta$  и сравнение результата с разложением (4) приводит к последовательности соотношений

$$\frac{1}{n!} \int_0^{\infty} \left\{ \frac{\text{ch}(k(\zeta+h))}{\text{sh}(k(\zeta+h))} \right\} \frac{k^n}{\text{ch}(kh)} (A(k, t) \cos(kx) + B(k, t) \sin(kx)) dk = \Phi_n, \quad n \geq 0 \quad (10)$$

в которых при чётных  $n$  берется верхнее выражение в фигурных скобках, а при нечётных – нижнее.

Домножение каждого уравнения (10) на  $(-\zeta)^n$  с последующим суммированием результатов приводит к соотношению

$$\int_0^{\infty} (A(k, t) \cos(kx) + B(k, t) \sin(kx)) dk = F(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} (-\zeta)^n \Phi_n \quad (11)$$

В результате из (11) следует

$$A(k, t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(x', t) \cos(kx') dx', \quad B(k, t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(x', t) \sin(kx') dx' \quad (12)$$

Подстановка (12) в (9) при  $n = 0$  приводит к уравнению вида

$$\Phi_0(x, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\text{ch}(k(\zeta(x, t) + h))}{\text{ch}(kh)} \int_{-\infty}^{+\infty} F(x', t) \cos(k(x-x')) dx' dk \quad (13)$$

Таким образом, совокупность соотношений (5–7, 13) определяет динамику потенциальных поверхностных волн.

Следует особо отметить, что при выводе упомянутых соотношений не делается никаких дополнительных предположений о малости возвышения  $\zeta$  по сравнению с характерным пространственным масштабом (например, с длиной волны). Единственное ограничение – отрицательные отклонения свободной поверхности не могут по абсолютному значению превышать глубину жидкости  $h$ .

Работоспособность полученных соотношений проверяется на классических предельных задачах.

**Предел инфинитезимальных волн.** Согласно определению инфинитезимальных волн, для всех  $k \neq \infty$  выполняется соотношение  $|k\zeta| \ll 1$ , так что допустимо разложение

$$\frac{\text{ch}(k(\zeta+h))}{\text{ch}(kh)} \approx 1 + k\zeta \text{th}(kh) + o(k\zeta \text{th}(kh)) \quad (14)$$

подстановка которого в уравнение (13), с удержанием членов вплоть до первого порядка малости по параметру  $k\zeta$ , сводит его к виду

$$\Phi_0(x, t) \approx \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (1 + k\zeta \text{th}(kh)) (\Phi_0(x', t) - \zeta(x', t) \Phi_1(x', t)) \cos(k(x-x')) dx' dk \quad (15)$$

Поскольку справедливы соотношения

$$f(x, t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x', t) \cos(k(x-x')) dx' dk$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x', t) \cos(k(x-x')) dx' = -\frac{1}{k^{2n}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial^{2n} f(x', t)}{\partial x'^{2n}} \cos(k(x-x')) dx'$$

уравнение (15) допускает эквивалентную запись

$$\int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \frac{\text{th}(kh)}{k} \frac{\partial^2}{\partial x'^2} \Phi_0(x',t) + \Phi_1(x',t) \right) \cos(k(x-x')) dx' dk \approx 0 \quad (16)$$

В инфинитезимальном пределе уравнения (6, 7) преобразуются к форме

$$\Phi_1 \approx \zeta'_t, \quad \frac{\partial \Phi_0}{\partial t} + g\zeta \approx 0 \quad (17)$$

Дифференцирование (16) по времени и использование (17) приводят к уравнению

$$\int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \zeta''_{tt} - g \frac{\text{th}(kh)}{k} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x'^2} \right) \cos(k(x-x')) dx' dk \approx 0 \quad (18)$$

Подстановка в (18) спектрального представления для поверхностного волнения

$$\zeta(x',t) = \int_{-\infty}^{+\infty} (A(\lambda,t) \cos(\lambda x') + B(\lambda,t) \sin(\lambda x')) d\lambda \quad (19)$$

показывает, что спектральные амплитуды (19) удовлетворяют уравнению

$$F''_{tt} + g\lambda \text{th}(\lambda h) F = 0 \quad (20)$$

где  $F$  – это  $A$  или  $B$ .

Соответствующее (20) дисперсионное уравнение совпадает с известным уравнением  $\omega^2 = g\lambda \text{th}(\lambda h)$  для малых гармонических волн на воде [6].

При наложении условия стационарности поверхностного волнения ( $\zeta''_{tt} = c^2 \zeta''_{xx}$ , где  $c$  – скорость распространения) из (18, 19) следует известный результат [7]: волна имеет синусоидальную форму  $\zeta(x,t) = a \sin(\mu(x-ct) + b)$  ( $a$ ,  $b$ ,  $\mu$  – постоянные), а ее скорость определяется выражением  $c^2 = g \text{th}(\mu h) / \mu$ .

Если волна представляет собой длинноволновой пакет (т.е. носители спектральных амплитуд  $A$  и  $B$  ограничены областью  $|\lambda h| \ll 1$ ), соотношение (18) приобретает вид

$$\int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \zeta''_{tt} - gh \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x'^2} \right) \cos(k(x-x')) dx' dk \approx 0,$$

из которого следует, что возвышение поверхности удовлетворяет уравнению

$$\zeta''_{tt} - gh \zeta''_{xx} = 0 \quad (21)$$

Согласно (21), длинноволновой пакет распространяется со скоростью  $c = \sqrt{gh}$ , практически не испытывая дисперсии (результат Стокса).

**Кноидальные волны, солитон Рассела и КдФ-уравнение.** В случае волн конечной амплитуды  $a$  с характерным продольным масштабом  $L$ , для которых справедливы отношения  $a \ll h \ll L$ , возникают два малых параметра задачи  $\varepsilon = a/h$  и  $\delta = h/L$ . Дальнейшее исследование удобно проводить в безразмерных переменных  $x'$ ,  $t'$ , определяемых соотношениями

$$x = Lx', \quad t = \frac{L}{c} t', \quad \zeta = a Z(x',t'), \quad \max|Z| = 1$$

где  $c$  – характерный масштаб скорости распространения поверхностных возмущений.

Нормировка волнового числа  $k$  в интегральном уравнении (13) на продольный масштаб  $L$  ( $k = k'/L$ ) и использование малости параметров  $\varepsilon$  и  $\delta$  позволяет при  $k'\delta \leq 1$  использовать разложение

$$\frac{\text{ch}(k(\zeta+h))}{\text{ch}(kh)} \approx 1 + \frac{\varepsilon \delta^2 Z}{2} (\varepsilon Z + 2) k^2 + \frac{\varepsilon \delta^4 Z}{24} ((\varepsilon Z)^3 + 4(\varepsilon Z)^2 - 8) k^4 + \dots \quad (22)$$

где в правой части, также как и в дальнейшем, штрихи у безразмерных переменных для краткости опускаются.

Подстановка (22) в (13) приводит к результату

$$\Phi_0(x,t) \approx F(x,t) - \frac{\varepsilon \delta^2 Z}{2} (\varepsilon Z + 2) F''_{xx} + \frac{\varepsilon \delta^4 Z}{24} ((\varepsilon Z)^3 + 4(\varepsilon Z)^2 - 8) F''''_{xxxx} \quad (23)$$

где функция  $F(x,t)$  определена в (11).

Введение функции  $S(x,t)$ , такой что  $Z = S'_t$ , позволяет в рамках принятого приближения проинтегрировать уравнения (6, 7)

$$\Phi_0 \approx \varepsilon L c \left( -\sigma S + \frac{\varepsilon}{2} \int (\delta^2 S''_{tt} - \sigma^2 S'^2_{xt}) dt \right), \quad \Phi_1 \approx \varepsilon \delta c (S''_{tt} - \varepsilon \sigma S'_x S''_{xt}) \quad (24)$$

где  $\sigma = gh/c^2$ .

Кроме того, из (5) следует

$$\Phi_2 \approx \frac{\varepsilon \sigma c}{2L} S''_{xx} \quad (25)$$

Уравнение (23) при подстановке в него соотношений (24, 25) сводится, с точностью до членов третьего порядка малости по  $\varepsilon$  и  $\delta$ , к уравнению

$$\sigma S''_{xx} - S''_{tt} + \frac{\delta^2 \sigma}{3} S''''_{xxxx} + \varepsilon \sigma (S'_x S''_{xt} + S'_t S''_{xx}) + \frac{\varepsilon \sigma^2}{2} \int (S'^2_{xt})''_{xx} dt \approx 0 \quad (26)$$

В случае стационарных волн, когда имеет место  $S(x,t) = S(x-t)$ ,  $\zeta(x,t) = \zeta(x-t)$ , уравнение (26) преобразуется к виду

$$\frac{\delta^2 \sigma}{3} Z'' + (\sigma - 1) Z + \varepsilon \sigma (1 + \sigma/2) Z^2 = 0 \quad (27)$$

Как было показано в [2], уравнение (27) имеет нетривиальные решения, когда  $\sigma = 1 + \varepsilon \sigma_1 + o(\varepsilon)$ ,  $\delta = \sqrt{\varepsilon} (\delta_0 + \varepsilon \delta_1 + o(\varepsilon))$ , так что

$$Z(y) = 1 - 3\alpha m^2 \text{sn}^2(y, m), \quad \alpha = \left( 1 + m^2 \pm \sqrt{1 + m^4 - m^2} \right)^{-1}, \quad y = x - t \quad (28)$$

где  $\text{sn}(y, m)$  – эллиптическая функция Якоби [8]

$$\operatorname{sn}(y, m) = \sin \varphi, \quad y = \int_0^\varphi \frac{d\theta}{\sqrt{1 - m^2 \sin^2 \theta}}, \quad m \in [0, 1],$$

$$\text{при этом } \delta_0 = \frac{3\sqrt{\alpha}}{2}, \quad \sigma_1 = \mp 3\alpha \sqrt{1 + m^4 - m^2}.$$

Решение (28) описывает семейство кноидальных волн, продольные масштабы которых  $L(m) \approx h\varepsilon^{-1/2}/\delta_0(m)$  и скорость распространения  $c^2(m) = gh/(1 + \varepsilon\sigma_1)$  зависят от параметра  $m$ . В предельном случае  $m = 1$  соотношения (28) дают уединенную волну Рассела [7].

В общем случае дифференцирование уравнения (26) по времени позволяет записать его в форме

$$\sigma Z''_{xx} - Z''_t + \frac{\delta^2 \sigma}{3} Z''''_{xxxx} + \varepsilon \sigma \left[ \left( Z'_x \int Z'_x dt + Z \int Z''_{xx} dt \right)' + \frac{\sigma}{2} \left( \left( \int Z'_x dt \right)^2 \right)'' \right]_{xx} \approx 0 \quad (29)$$

структура которой подсказывает, каким образом возможно достижение этого результата без использования интегрального описания.

Согласно методу [9], исходная система (1) сводится к системе двух уравнений вида

$$\sigma Z + \delta R'_t + \frac{\varepsilon \delta^2}{2} R'^2_x - \frac{\delta^3}{2} (1 + \varepsilon Z)^2 R''_{xx} + \dots = 0 \quad (30)$$

$$Z'_t + \varepsilon \delta R'_x Z'_x + \delta (1 + \varepsilon Z) R''_{xx} - \frac{\delta^3}{6} \left( (1 + \varepsilon Z)^3 R'''_{xxx} \right)'_x + \dots = 0$$

где функция  $R$  входит в соотношение, определяющее потенциал поля скорости

$$\varphi = \sum_{j=0}^{\infty} (-\delta(1+z)^2)^j \frac{1}{(2j)!} \frac{\partial^{2j} R(x,t)}{\partial x^{2j}}.$$

Исключение из системы (30) переменной  $R$  методом теории возмущений, предложенном в [9] (в рамках этого метода величине  $Z$  приписывается некоторый неопределенный порядок малости, что противоречит ее определению, поскольку по принципу построения  $Z \sim O(1)$ ), приводит к известному уравнению

Кортевега-де Фриза, в котором сохранены члены порядков  $\varepsilon$  и  $\delta^2$ . В то же время, комбинация вида  $A''_{xx} - B'_t + \delta^2 A''''_{xxxx}/3$ , где  $A$  и  $B$  – первое и второе уравнения системы (30) соответственно, при сохранении членов порядков  $\varepsilon$  и  $\delta^2$  приводит к уравнению (29).

В отличие от КдФ-уравнения, (29) обладает тем свойством, что если существует его решение  $Z(x-t)$ , то функция  $Z(x+t)$  также удовлетворяет этому уравнению. Как следствие, волны могут распространяться в любую сторону, и не

возникает искусственная анизотропия пространства, противоречащая исходной системе (1).

Подобная анизотропия (для типов волн, исследуемых в данном разделе) наблюдается и в свойствах приближенных систем уравнений, предложенных в [3, 4]. При этом исходным точным системам [3, 4] эта анизотропия не свойственна, она возникает в результате применения к ним теории возмущений, развитой в [9].

Необходимо подчеркнуть, что анизотропия КдФ-уравнения, полученного в оригинальной работе [10], носит искусственный характер, так как авторы изначально рассматривали задачу о малых медленных длинномасштабных возмущениях потока жидкости, текущего в положительном направлении горизонтальной оси со скоростью  $u = u_0$ . При отказе от малости возмущений использование подхода, представленного в настоящей работе, применительно к постановке [10] приводит к возникновению пары КдФ-уравнений

$$Z'_t \pm \left( \mu - \frac{\sigma}{\mu} \right) Z'_x \mp \frac{\varepsilon \sigma}{\mu} \left( 1 + \frac{\sigma}{2\mu^2} \right) (Z^2)'_x \mp \frac{\delta^2 \sigma}{3\mu} Z'''_{xxx} = 0 \quad (31)$$

где  $\mu = u_0/c$ ,  $c$  – характерный масштаб скорости распространения поверхностных возмущений.

В (31) для волны бегущей в положительном направлении оси  $x$  берутся верхние знаки, для противоположного направления – нижние. При этом для второго уравнения (31) возмущение исходного поля скорости определяется величиной  $-2u_0$  плюс малая поправка по сравнению с  $u_0$ . Парные уравнения (31) взаимно переходят друг в друга при замене  $\mu \leftrightarrow -\mu$  (то есть при смене направления исходного течения), что устраняет искусственную пространственную анизотропию. В то же время, использование (29) более адекватно при описании исследуемого типа движений, поскольку это уравнение, в отличие от (31) и уравнения оригинальной работы [10], не вырождается в предельном случае  $u_0 \rightarrow 0$ .

**Солитон огибающей и нелинейное уравнение Шредингера.** В качестве еще одного примера работоспособности соотношений (5 – 7, 13) рассматривается распространение модулированной волны Стокса малой, но конечной амплитуды на бесконечно глубокой воде. Следуя [11], задается представление этой поверхностной волны

$$\zeta = a \cos \Psi + \frac{ka^2}{2} \cos 2\Psi + \frac{3k^2 a^3}{8} \cos 3\Psi + \frac{k^3 a^4}{3} \cos 4\Psi + \dots \quad (32)$$

В классической волне Стокса  $a = a_0$ ,  $k = k_0$  – постоянные величины, а фазовая функция определяется выражением  $\Psi = k_0 x - \omega_0 t$ . В представлении (32) амплитуда, волновое число и фаза считаются медленно меняющимися функциями координаты  $x$  и времени  $t$ . Скорость изменения перечисленных характеристик задается величиной малого параметра задачи  $\varepsilon = k_0 a_0 \ll 1$ . Это позволяет задать характеристики волны в виде

$$a = a(x_1, x_2, \dots; t_1, t_2, \dots), \quad k = k_0 + \kappa(x_1, x_2, \dots; t_1, t_2, \dots)$$

$$\Psi = k_0 x - \omega_0 t + \psi(x_1, x_2, \dots; t_1, t_2, \dots)$$

где  $x_n = \varepsilon^n x$ ,  $t_n = \varepsilon^n t$ .

Дальнейшее исследование проводится в безразмерных переменных  $x' = k_0 x$ ,  $t' = \omega_0 t$ ,  $\kappa' = \kappa/k_0$ ,  $a' = a/a_0$ , причем штрихи для сокращения записи опускаются. Безразмерное поверхностное волнение описывается функцией  $\eta = k_0 \zeta$ , а приведение к безразмерному виду соотношений (5 – 7, 13) достигается введением функций  $\varphi_n$ , таких что  $\Phi_n = \omega_0 k_0^{n-2} \varphi_n$ ,  $n \geq 0$ .

В результате поверхностное волнение задается выражением

$$\eta = \varepsilon a \cos(x - t + \psi) + \frac{\varepsilon^2}{2} (1 + \kappa) a^2 \cos(2(x - t + \psi)) +$$

$$+ \frac{3\varepsilon^3}{8} (1 + \kappa)^2 a^3 \cos(3(x - t + \psi)) + \frac{\varepsilon^4}{3} (1 + \kappa)^3 a^4 \cos(4(x - t + \psi)) + \dots \quad (33)$$

а соотношения (5 – 7, 13) для бесконечно глубокой воды (величина  $\text{ch}(k(\zeta + h))/\text{ch}(kh)$  заменяется на  $\exp(k\zeta)$ ) приобретают форму

$$\frac{\partial \varphi_0}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \varphi_1 \left( 1 + \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 \right) \right] + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \varphi_1^2 \left( 1 + \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 \right) \right] + \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \sigma \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0$$

$$\varphi_n = \frac{\varphi_{n-1} \eta''_{xx} + 2\varphi'_{n-1} \eta'_x - \varphi''_{n-2} \eta_{xx} / (n-1)}{n(1 + \eta_x'^2)} \quad (34)$$

$$\varphi_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \exp(k\eta) \int_{-\infty}^{+\infty} f(x', t) \cos(k(x - x')) dx' dk$$

$$f = \varphi_0 - \eta \varphi_1 + \eta^2 \varphi_2 - \eta^3 \varphi_3 + \dots$$

где  $\sigma = gk_0/\omega_0^2$  при отсутствии модуляций волны.

Для определения функций  $a$ ,  $\kappa$ ,  $\psi$  и  $\varphi_n$  выражение (33) подставляется в соотношения (34), причем, согласно методу многих масштабов [12], функции  $\varphi_n$ ,  $\kappa$ , параметр  $\sigma$  и дифференциальные операторы  $\partial/\partial x$ ,  $\partial/\partial t$  разлагаются в ряды по малому параметру  $\varepsilon$

$$\varphi_n = \varepsilon \varphi_{n1} + \varepsilon^2 \varphi_{n2} + \varepsilon^3 \varphi_{n3} + \dots, \quad \kappa = \varepsilon \kappa_1 + \varepsilon^2 \kappa_2 + \dots$$

$$\sigma = \sigma_0 + \varepsilon \sigma_1 + \varepsilon^2 \sigma_2 + \dots, \quad \sigma_0 = gk_0/\omega_0^2$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial x_1} + \varepsilon^2 \frac{\partial}{\partial x_2} + \dots, \quad \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t_1} + \varepsilon^2 \frac{\partial}{\partial t_2} + \dots$$

Интегрирование первого уравнения (34) определяет вид функции  $\varphi_0$ , который здесь не приводится по причине его некоторой громоздкости.

Из второго уравнения следует вид функции  $\varphi_1$ . Кроме того, из условия отсутствия в этом уравнении секулярных членов следует  $\sigma_0 = gk_0/\omega_0^2 = 1$  (дисперсионное уравнение волн малой амплитуды на поверхности бесконечно глубокой жидкости),  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ , а амплитудная  $a$  и фазовая  $\psi$  функции зависят от переменных  $a = a(r, t_2)$ ,  $\psi = \psi(r)$ , где  $r = x_1 - t_1/2$ , причем  $\psi''_{rr} = 0$ .

Третье уравнение (34) позволяет вычислить в явном виде необходимые в данной задаче функции  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$ .

Таким образом, оказываются определенными через неизвестные пока функции  $a$  и  $\psi$  величины  $\varphi_0$  и  $f$ , которые необходимо подставить в интегральное уравнение – четвертое уравнение системы (34). Такая подстановка приводит к тому, что интегральное уравнение тождественно удовлетворяется до членов третьего порядка малости по  $\varepsilon$  включительно. Для того чтобы обращаться в ноль член четвертого порядка, необходимо выполнение условий

$$\kappa_1 = \frac{\partial \psi}{\partial r} = \text{const}, \quad \frac{\partial^2 a}{\partial r^2} + 4a^3 - a \left( \frac{\partial \psi}{\partial r} \right)^2 = 0, \quad \frac{\partial a}{\partial r} \frac{\partial \psi}{\partial r} - 4 \frac{\partial a}{\partial t_2} = 0 \quad (35)$$

Интегрирование этих уравнений определяет решение в виде солитона огибающей нелинейного уравнения Шредингера [11]. При этом необходимо отметить, что использование уравнений (34), которые отражают специфику поверхностных волн, позволяет получить парные уравнения Шредингера (35) в существенно упрощенном виде (естественно, это справедливо только для задачи волн на воде).

**Описание поверхностных волн с помощью функции тока.** Исследование двумерных движений несжимаемой жидкости допускает альтернативный подход, связанный с введением функции тока  $\psi$ , такой что  $u = \psi'_z$ ,  $w = -\psi'_x$ . Использование разложения

$$\psi = \Psi_0(x, t) + \Psi_1(x, t)(z - \zeta) + \Psi_2(x, t)(z - \zeta)^2 + \Psi_3(x, t)(z - \zeta)^3 + \dots$$

для функции тока вблизи свободной поверхности, и применение метода, развитого при потенциальном описании движений, приводит к системе соотношений, аналогичных выражениям (5 – 7, 13).

$$\Psi_n = \frac{1}{n} \frac{\Psi_{n-1} \zeta''_{xx} + 2\Psi'_{n-1} \zeta'_x - \Psi''_{n-2} \zeta_{xx} / (n-1)}{1 + \zeta_x'^2}, \quad n \geq 2$$



$$\frac{\partial \Psi_0}{\partial x} + \zeta'_t = 0, \quad \frac{\partial}{\partial t} [\Psi_1(1 + \zeta_x'^2)] + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} [\Psi_1^2(1 + \zeta_x'^2)] + \zeta_{tt}' \zeta_x' + g \zeta_x' = 0$$

$$\Psi_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{\text{sh}(k(\zeta(x, t) + h))}{\text{sh}(kh)} \int_{-\infty}^{+\infty} F(x', t) \cos(k(x - x')) dx' dk$$

где  $F(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} (-\zeta)^n \Psi_n$ .

Исследование инфинитезимального предела системы (36) приводит к тем же результатам, что и в случае описания движений через потенциал. Но в случае длинных волн конечной амплитуды система (36) сводится к уравнению

$$\sigma R_{xx}'' - R_{tt}'' + \frac{\delta^2}{3} R_{ttxx}^{IV} + \varepsilon (R_x' R_{tt}'' + 2R_t' R_{xt}'') \approx 0$$

при этом  $Z = R_x'$ , все величины в (37) безразмерные.

Уравнение (37) предоставляет альтернативный уравнению (26) способ описания таких волн. В стационарном пределе оно имеет те же самые решения (28). Дифференцирование (37) по  $x$  приводит к уравнению

$$\sigma Z_{xx}'' - Z_{tt}'' + \frac{\delta^2}{3} Z_{ttxx}^{IV} + \varepsilon \left( Z \int Z_{tt}'' dx + 2Z_t' \int Z_t' dx \right)_x \approx 0$$

альтернативному уравнению (29).

Поскольку уравнения (29) и (38) описывают один и тот же процесс, их возможные решения должны совпадать, причем не только в стационарном пределе. Для доказательства этого факта вводится функция  $T$ , такая что  $Z = T_{xt}''$ . В результате уравнения (29, 38) приобретают форму

$$L(T_t') + \frac{\delta^2 \sigma}{3} T_{xxxxt}^{IV} + \varepsilon \sigma \left( (T_{xx}'' T_{xt}'')_t + \frac{\sigma}{2} (T_{xx}''^2)_x \right) \approx 0$$

$$L(T_t') + \frac{\delta^2}{3} T_{xxxxt}^{IV} + \varepsilon \left( (T_{xt}'' T_{tt}'')_t + \frac{1}{2} (T_{tt}''^2)_x \right) \approx 0$$

где  $L = \sigma \partial^2 / \partial x^2 - \partial^2 / \partial t^2$ .

При подстановке решения  $T$  любого из уравнений (39) в оставшееся уравнение возникает невязка вида

$$\frac{\delta^2}{3} L(T_{xxx}''') + \varepsilon \left( (T_{xt}'' L(T))_t + \frac{1}{2} (L(T) M(T))_x \right), \quad M = \sigma \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial t^2$$

Согласно любому уравнению (39) величина  $L(T)$  имеет порядок малости не ниже  $\delta^2$  или  $\varepsilon$ . В результате невязка (40) имеет, по меньшей мере, тот же порядок малости, что и отброшенные члены в приближенных уравнениях (39). Таким образом, в приближении длинных волн конечной амплитуды решения уравнений (29) и (38) совпадают.

### Волны на двумерной поверхности с учетом поверхностного натяжения.

Описание двумерных возмущений поверхности  $\zeta(x, y, t)$  достижимо только на основе потенциала скорости. Обобщение ранее изложенного подхода приводит к системе уравнений вида

$$\Phi_1 = \frac{\zeta_t' + \nabla \Phi_0 \cdot \nabla \zeta}{G_s^2}, \quad \Phi_n = \frac{\Phi_{n-1} \Delta \zeta + 2 \nabla \Phi_{n-1} \cdot \nabla \zeta - \Delta \Phi_{n-2} / (n-1)}{n G_s^2}, \quad n \geq 2$$

$$\frac{\partial \Phi_0}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ (\nabla \Phi_0)^2 - \frac{(\zeta_t' + \nabla \Phi_0 \cdot \nabla \zeta)^2}{G_s^2} \right] + g \zeta + \alpha \nabla \cdot \left( \frac{\nabla \zeta}{G_s} \right) = 0$$

$$\Phi_0(x, y, t) = \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{\text{ch}(k(\zeta + h))}{\pi^2 \text{ch}(kh)} \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\xi, \eta, t) \cos(k_x(x - \xi)) \cos(k_y(y - \eta)) d\xi d\eta \right] dk_x dk_y$$

где, как и ранее,  $F(x, y, t) = \sum_{n=0}^{\infty} (-\zeta)^n \Phi_n$ ,  $k^2 = k_x^2 + k_y^2$ ,  $\alpha$  – коэффициент по-

верхностного натяжения, нормированный на плотность жидкости,  $G_s^2 = 1 + (\nabla \zeta)^2$ .

Инфинитезимальный предел уравнений (41) дает известные результаты для бесконечно малых капиллярно-гравитационных волн на воде.

В том случае, когда амплитуда волн существенно меньше глубины жидкости, характерный пространственный масштаб  $L_x$  волн вдоль оси  $x$  превышает глубину, но при этом он меньше пространственного масштаба  $L_y$  вдоль оси  $y$ , система (41) (в пренебрежении эффектами поверхностного натяжения) сводится к уравнению вида

$$\sigma (Z_{xx}'' + \lambda^2 Z_{yy}'') - Z_{tt}'' + \frac{\delta^2 \sigma}{3} Z_{xxxx}^{IV} + \varepsilon \sigma \left[ \left( Z_x' \int Z_x' dt + Z \int Z_{xx}'' dt \right)_t + \frac{\sigma}{2} \left( \left( \int Z_x' dt \right)^2 \right)_{xx} \right] \approx 0$$

Здесь используются те же обозначения, что и в (29), при этом  $\lambda = L_x / L_y \ll 1$ .

При  $\lambda \rightarrow 0$  уравнение (42) переходит в уравнение (29). Аналогичный переход в уравнении Кадомцева-Петвиашвили (КП-уравнение) [13] приводит к КдФ-уравнению, дополнительно продифференцированному по  $x$ .

Так же, как и в случае с КдФ-уравнением, уравнение (42) не нарушает изотропии пространства, в отличие от КП-уравнения. Но поскольку КП-уравнение получено на основе КдФ-уравнения [13], его анизотропия также носит искусственный характер. Реализация подхода [10] применительно к системе (41) порождает парные КП-уравнения

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( Z'_i \pm \left( \mu - \frac{\sigma}{\mu} \right) Z'_x \mp \frac{\varepsilon \sigma}{\mu} \left( 1 + \frac{\sigma}{2\mu^2} \right) (Z^2)'_x \mp \frac{\delta^2}{\mu} \left( \frac{\sigma}{3} - \beta \right) Z'''_{xxx} \right) = \pm \frac{\lambda^2 \sigma}{\mu} Z''_{yy} \quad (43)$$

которые взаимно переходят друг в друга при замене  $\mu \leftrightarrow -\mu$ .

По причине вырождения КП-уравнений при  $u_0 \rightarrow 0$ , уравнение (42) более адекватно при описании данного типа движений двумерной поверхности.

**Заключение.** Представленные интегро-дифференциальные варианты описания одномерных (5–7, 13), (36) и двумерных (41) возмущений свободной поверхности жидкости представляют собой еще один подход к исследованию волновых движений. В частности, полученные соотношения позволяют путем прямой подстановки осуществлять проверку разрабатываемых моделей поверхностного волнения.

### Литература

1. Некрасов А.И. О волнах установившегося вида // Изв. Иваново-Вознесенского политехн. ин-та. 1921. № 3. С. 52-65.
2. Кистович А.В., Чашечкин Ю.Д. Интегральная модель распространения установившихся потенциальных волн в жидкости // Доклады АН. 2008. Т. 241. № 3. С. 335-340.
3. J.G.V. Byatt-Smith. An integral equation for unsteady surface waves and a comment on the Boussinesq equation // J. Fluid Mech. 1971. V. 49. Pt. 4. P. 625-633.
4. Ablowitz M.J., Fokas A.S., Musslimani Z.H. On a new non-local theory of water waves // J. Fluid Mech. 2006. V.562. P. 313-343.
5. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука. ГРФМЛ. 1986. 734 с.
6. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. М.: Наука. ГРФМЛ. 1977. 816 с.
7. Г. Ламб. Гидродинамика. М, Л: ОГИЗ – Гостехиздат. 1947. С. 476. 928 с.
8. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: ГИФМЛ, 1962. 1100 с.
9. Р. Додд, Дж. Эйлбек, Дж. Гиббон, Х. Моррис. Солитоны и нелинейные волновые уравнения. М.: Мир, 1988, 694 с.
10. Korteweg D.J., de Vries G. On the change form of long waves advancing in a rectangular canal, and on a new type of long stationary waves. // Phyl. Mag. 1895. e5. P. 422-443.
11. H.C. Yuen, V.M. Lake. Nonlinear deep water waves: Theory and experiment // The physics of fluids. 1975. V. 18. N. 8. pp. 956-960.
12. А. Найфэ. Введение в методы возмущений. М.: Мир. 1984. 536 с.
13. Кадомцев Б.Б., Петвиашвили В.И. Об устойчивости уединенных волн в среде со слабой дисперсией. // Доклады АН СССР. Т. 192. №4. 1970. С. 753-756.

### ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УЕДИНЕННЫХ ВОЛН НА ВОДЕ

Клейменичева Е.В., Мочулин П.В., Шелковников Н.К.

*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова*

В работе проведен гармонический анализ процессов взаимодействия солитонов как на чистой воде так и при наличии флотации и поверхностно-активных веществ. Рассмотренные вопросы могут быть полезны при решении экологических задач.

Большой вклад в исследование солитонов в жидкости внесли Джон Скотт Рассел [1] (впервые обнаружил уединенную волну), Буссинеск [2], Кортвег и де Вриз [3]. В дальнейшем это направление развивалось в работе Ферми, Пасты и Улама [4], в которой была исследована задача о порождении теплового хаоса в цепочке нелинейно связанных осцилляторов. Было обнаружено отсутствие термализации энергии (то есть распределения энергии по всем модам) и возвращение системы к начальному состоянию с одной возбужденной основной модой, получившее впоследствии название «возврат ФПУ». Позже, Н.Забуски и М.Крускал [5] перешли от дискретной задачи в виде цепочки точечных осцилляторов к непрерывной модели. Для удобства они рассматривали эволюцию волн в диспергирующей среде на замкнутой кольцевой траектории. Своими расчетами Забуски и Крускала показали, что начальный синусоидальный профиль волны со временем трансформируется в цепочку импульсов, распространяющихся вправо со скоростью, пропорциональной их амплитуде. Каждый из этих импульсов приблизительно может быть описан решением уравнения КдВ в виде уединенной волны. Забуски и Крускалом было показано, что в процессе столкновения импульсов друг с другом, больший импульс (обладающий большей амплитудой), догонял и последовательно сталкивался с каждым из впереди идущих импульсов меньшей амплитуды. При этом все взаимодействующие импульсы сохраняли свою индивидуальность (высоту, ширину и скорость). Единственным следствием столкновения являлся фазовый сдвиг - больший импульс оказывался сдвинутым вперед по отношению к ситуации до взаимодействия, а меньший – смещался назад. В итоге самый большой импульс оказывался самым правым. Такое «частицеподобное» поведение импульсов побудило Забуски и Крускала дать им особое название – «солитон».

Одним из важных достижений в области исследования солитонов является работа Гарднера, Грина, Крускала и Миура [6], которые впервые получили для уравнения КдВ аналитическое решение задачи Коши при произвольном начальном условии. Ими было показано, что при столкновении солитоны не обмениваются энергией, их фазовые скорости и форма не изменяются, а происходит лишь изменение фаз (сдвиги координат их центров): более быстрый солитон смещается вперед, а более медленный — назад, так что солитоны ведут себя, как отталкивающиеся частицы. Тем не менее, при различных амплитудах, взаимодействующие солитоны обмениваются энергиями. В частности, больший солитон, догоняя меньший, проходит через него, частично забирая энергию солитона. Что делает еще большим разницу в амплитудах обоих солитонов.

К настоящему времени, в экспериментальных исследованиях солитоны создавались в каналах с помощью волнопродукторов различного типа. Осталась практически без внимания возможность формирования уединенных волн под действием ветра. Генерация солитонов в этом направлении исследовалась в основном теоретически [7]. Изучение данных ветровых уединенных волн является актуальной задачей, так как при выходе на берег они способны приносить не меньший ущерб и разрушения, чем сейсмические волны цунами [8]. Одной из наших задач являлось исследование особенностей формирования и взаимодействия солитонов под действием ветра [9].

С этой целью нами были проведены эксперименты в кольцевом аэрогидроканале. Для проведения экспериментов канал заполнялся водой до заданной высоты, и, при выбранном режиме скорости ветра, включалась ветровая установка. На поверхности жидкости возникала рябь, гравитационные волны, трохноидальные и кноидальные волны, амплитуда которых со временем возрастала. В итоге формировались несколько уединенных волн, постоянно взаимодействующих друг с другом, что приводило к формированию одной уединенной волны. Возможность образования определенного числа волн зависела от величины скорости ветра в воздушном коридоре и глубины жидкости. Проведены исследования влияния различного количества флотации и концентрации ПАВ на характер развития уединенных волн и их параметры.

Эксперименты показали, что под действием ветра образуется до 6 солитонов, в результате взаимодействия между которыми образовывался один единственный солитон. Рассмотрим случай, когда во всем канале оставались только два солитона. При расположении солитонов на достаточно близком расстоянии друг от друга второй солитон экранировал первый от воздействия ветра, вследствие чего его скорость увеличивалась, он догонял первый солитон и происходило столкновение. В результате солитоны обменивались энергиями, отталкивались друг от друга и расходились на некоторое расстояние, до полутора метров. При этом амплитуда второго солитона становилась меньше, но через некоторое время после их расхождения, она восстанавливалась под воздействием ветра и происходило повторное взаимодействие. Этот процесс мог продолжаться в течение некоторого времени пока меньший солитон не отставал настолько, что окажется впереди первого (большого). В этом случае больший солитон проходит через меньший. В результате одного или двух таких проходов остается только один солитон, а меньший - разрушается.

Нами был проведен гармонический анализ сталкивающихся солитонов в различных фазах развития: задолго до столкновения, когда солитоны еще не влияли друг на друга, в момент их наиболее близкого положения и после столкновения, при расхождении на значительное расстояние друг от друга. Гармонический анализ проводился как для солитонов в чистой воде, так и при наличии ПАВ и флотации. Как можно видеть из графиков (рис. 1, 2), гармонический состав двух взаимодействующих солитонов на большом расстоянии подобен. Это справедливо как для чистой поверхности жидкости, так и при наличии на ней флотации.

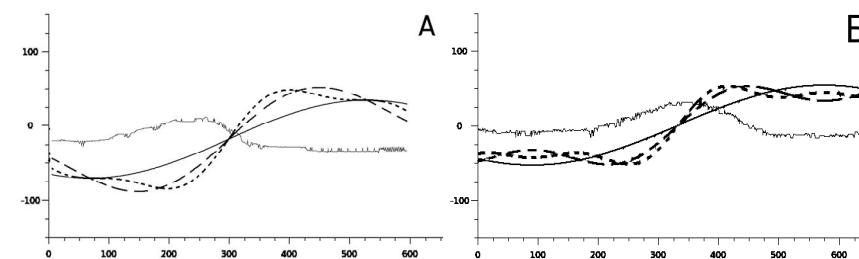


Рис. 1. Гармонический анализ первого (а) и второго (б) солитонов до их взаимодействия на чистой воде.

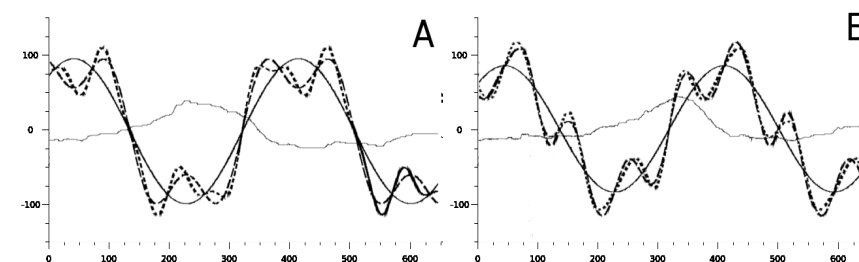


Рис. 2. Гармонический анализ первого (а) и второго (б) солитонов до их взаимодействия при наличии флотации

Здесь и далее на рисунках приведены волнограммы солитонов и их восстановление по гармоникам — сплошная линия соответствует восстановлению с помощью только первой гармоники, пунктирные линии — восстановление по сумме первых двух и первых трех гармоник соответственно уменьшению длины штриха пунктирной линии.

Далее нами был проведен анализ первых гармоник солитонов на протяжении всего процесса их взаимодействия. Как можно видеть из рис. 3 наибольшие изменения отмечаются в первой и второй гармониках. Остальные гармоники подвержены меньшим изменениям.

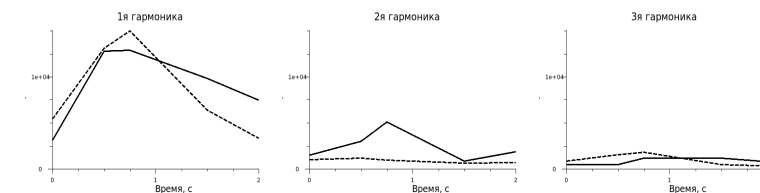


Рис 3. График изменения первых гармоник солитонов при их взаимодействии на чистой воде. Непрерывной линией обозначены гармоники первого солитона, пунктирной — второго.

После взаимодействия, когда солитоны расходились на значительное расстояние, гармонический состав большего солитона восстанавливался и был подобен исходному состоянию, тогда как меньший, отставший, солитон только показывал тенденцию к восстановлению.

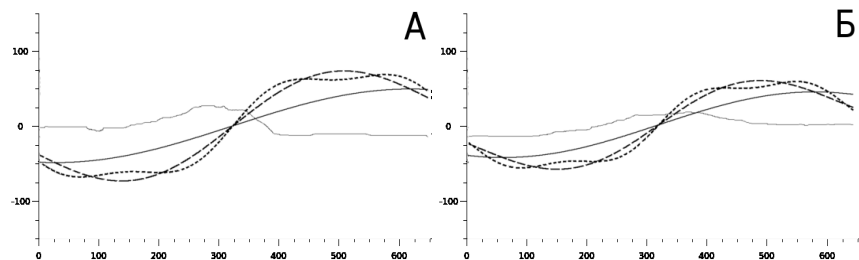


Рис. 4. Гармонический анализ первого (а) и второго (б) солитонов после их взаимодействия на чистой воде.

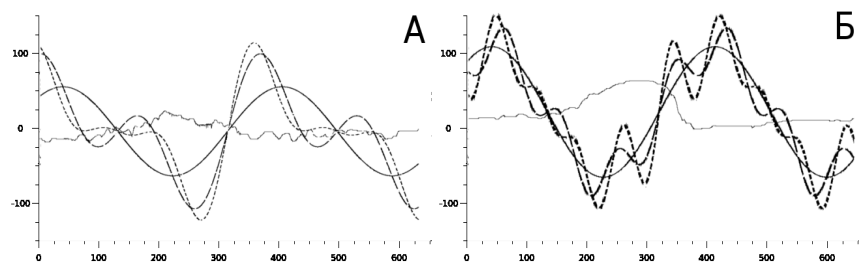


Рис. 5. Гармонический анализ первого (а) и второго (б) солитонов после их взаимодействия при наличии флотации.

В процессе проведения эксперимента, нами было рассмотрено изменение амплитуд и длин волн взаимодействующих солитонов (табл.1). Показано, что при взаимодействии солитонов их длина уменьшалась при уменьшении расстояния между пиками, а при увеличении расстояния, когда солитоны расходились - она увеличивалась. В изменении амплитуды наблюдались колебания - при сближении амплитуда 1-го солитона сначала уменьшалась, затем, в момент достижения минимального расстояния между солитонами, начинала возрастать. Амплитуда второго солитона до момента максимального сближения изменялась также как и у первого, но при расхождении солитонов друг от друга — уменьшалась. После взаимодействия, когда солитоны находились уже достаточно далеко друг от друга, они частично восстанавливали свое первоначальное состояние, но при этом первый

солитон становился больше по амплитуде и меньше по длине волны, а второй — наоборот.

Таблица 1. Количественные данные параметров солитонов: до взаимодействия (№1), при взаимодействии (№2-10) и после взаимодействия (№11).

№	амплитуда, см		длина волны, см		скорость, см/с		расстояние между пиками, см
	1 солитон	2 солитон	1 сол.	2 сол.	1 сол.	2 сол.	
1	18.75	17.5	129.1	117.56	115,56	66,36	160
2	15.93	16.48	111.54	115.38	56,92	33,8	110
3	15.38	14.84	94.41	115.93	39,56	13,16	101
4	15.38	14.84	105.93	109.89	57,16	35,16	98
5	16.48	14.29	100.33	120.88	13,04	94,48	98
6	16.48	14.29	96.26	115.38	52,76	46,16	90
7	17.58	15.93	107.47	125.27	19,8	11	98
8	17.58	13.74	97.8	118.68	30,76	70,32	105
9	18.13	14.84	100	125.27	41,76	61,52	109
10	16.48	14.29	103.01	110.44	68,12	73,92	112
11	19.5	15.61	126.33	174.07	98,6	57,48	180

Из вышеприведенного можно сделать следующие выводы: Под действием ветра в кольцевом аэрогидроканале может возникать до 6 солитонов, расположенных по мере уменьшения амплитуд. Проведенный гармонический анализ процесса взаимодействия солитонов, как на чистой воде, так и при наличии флотации и ПАВ показал, что гармонический состав двух взаимодействующих солитонов на большом расстоянии друг от друга подобен. При их столкновении наиболее существенные изменения происходят в первой и второй гармониках обоих солитонов. Остальные гармоники подвержены меньшим изменениям. После взаимодействия, когда солитоны расходились на значительное расстояние, гармонический состав первого солитона восстанавливался и был подобен исходному состоянию, тогда как второй солитон только показывал слабую тенденцию к восстановлению.

### Литература

1. Russell J.S. Report on waves, // Rep. 14<sup>th</sup> Meeting of the British Association for the Advancement of Science. John Murray. London. 1844. P.311—390.
2. Boussinesq M.J. "Theorie de l'intumescence liquide appelee onde solitaire ou de translation, se propageant dans un canal rectanguliere", Paris, 1871, pp. 575—579"
3. Korteweg D.J., de Vries G. On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal and on a new type of long stationary waves // Philos. magazine and J. of Scienc. 1895. V. 39. Ser. 5 p. 422—443.
4. Fermi A., Pasta J., Ulam S. "Studies of Nonlinear Problems"// Los Alamos Report, LA.1955.
5. Zabusky N.J., Kruskal M.D. Interaction of "solitons" in a collisionless plasma and the recurrence of initial states // Phys. Rev. Lett. 1965. V.15, P.240—243.

6. Gardner C.S., Greene J.M., Kruskal M.D., Miura R.M. Method for solving the Korteweg-de Vries equation // Phys. Rev. Lett., 1967.
7. Пелиновский Е.Н. Гидродинамика волн цунами. // ИПФ РАН, Нижний Новгород, 1996г., 276с.
8. Конанкова Г.Е. Показеев К.В. Динамика морских волн // М.: МГУ, 1985
9. Шелковников Н.К. Вынужденный солитон в жидкости // Письма в ЖЭТФ, том 82, вып. 10, с 720-723
10. Мочулин П.В. Шелковников, Н.К. Исследования ветровых солитонов в кольцевом аэрогидроканале. // Морской гидрофизического института НАН Украины. №5 2006г. С 53-61
11. Мочулин П.В. Шелковников Н.К. Генерация солитонов в чистой воде и при наличии поверхностно-активных веществ // Водные ресурсы РАН 2009 том 36 №2.

#### ВОДНЫЙ РЕЖИМ ВОДОСБОРА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВОЗМОЖНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Кондратьев С.А.<sup>1</sup>, Назарова Л.Е.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт озероведения РАН, г. Санкт-Петербург;*

<sup>2</sup> *Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, г. Петрозаводск.*

В пределах России на территории Республики Карелия расположено второе по величине озеро Европы - Онежское. Оно занимает площадь в 9 720 км<sup>2</sup>, из которых 350 км<sup>2</sup> приходится на 1650 островов. Протяженность озера с севера на юг – 290 км, с запада на восток – 82 км.

Бассейн озера расположен на двух контрастирующих частях земной коры с различными геологическими историями – Балтийском щите и Русском плато. Его природа характеризуется выраженной неоднородностью, обусловленной не только размерами, но и геологией котловины, неравномерным распределением приточности, различной степенью антропогенной нагрузки. Бассейн сложен труднорастворимыми кембрийскими породами, и поэтому минерализация вод притоков и самого озера очень низкая – 37 мг/л, что в 1,5 ниже, чем в воде Ладожского озера. Объем водной массы озера достигает 295 км<sup>3</sup>, средняя глубина – 30 м, максимальная – 120 м. В озеро впадают 52 реки длиной более 10 км, из которых только 8 рек имеют длину более 100 км. Сток из озера осуществляется по реке Свирь, несущей свои воды в Ладожское озеро. Площадь водосборного бассейна составляет 57300 км<sup>2</sup>.

В условиях обострившейся дискуссии о возможных причинах и последствиях потепления климата становится актуальной проблема реакции климатической системы и водных ресурсов на предстоящие изменения. Для территории водосбора Онежского озера за период 1951-2000 гг. характерны повышение годовой температуры воздуха на 0,9 °С, общего испарения 40-50 мм, сумм атмосферных осадков на 45 мм. Рост годовых сумм осадков компенсируется ростом общего испарения, в

результате чего линейный тренд в ряде суммарного речного притока в озеро отсутствует.

Региональные прогнозы, проводимые климатическими моделями и служащие в качестве отправных точек для исследования различных воздействий на климат, следует рассматривать скорее как наборы предполагаемых условий. Если даже знать точно количество парниковых газов, которое будет выделяться в будущем, с точностью предсказать, какова будет реакция климата во всем мире, невозможно, поскольку модели общей циркуляции, с помощью которых производятся прогнозы, еще не могут учитывать всей сложности взаимодействия между системами, которые оказывают постоянное воздействие на климат. Многочисленные исследования изменения глобального климата в результате удвоения концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере показывают, что современные модели климата дают большой разброс в оценках глобального потепления (от 1,9 до 5,2°С у поверхности Земли) (Мелешко и др., 2002), который обусловлен различиями описания важных климатообразующих обратных связей. Биосфера и геосфера, круговорот воды и отражающие поверхности ледников, изменяющийся поток солнечной энергии, направленный на Землю, – все эти факторы оказывают воздействие на атмосферные процессы и климат планеты.

Целью данного исследования является количественная оценка возможных изменений стока с водосбора Онежского озера с учетом его внутригодовой изменчивости в результате предполагаемых изменений климата в 21 веке.

В качестве инструмента для расчетов стока с водосбора Онежского озера при изменяющихся климатических параметрах использовалась гидрологическая модель системы «водосбор-водоем», разработанная в Институте озероведения и верифицированная на ряде объектов бассейна Ладожского озера (Кондратьев С.А., 1990; Кондратьев С.А., Бovyкин, 2000, 2003; Кондратьев, Шмакова, 2005). Модель описывает накопление и таяние снега, увлажнение почв зоны аэрации, испарение с поверхности водосбора, формирование стока с разделением на быструю и медленную составляющие. Кроме того, модель позволяет рассчитывать водный баланс водоема, однако этот блок не использовался в настоящих расчетах.

В рамках используемой модели формирование снежного покрова и его таяние описано следующим уравнением:

$$\frac{dx}{dt} = r_1 - r_2, \quad (1)$$

$$\text{где } r_1 = \begin{cases} R & \text{для } T < 0, \\ 0 & \text{для } T \geq 0, \end{cases} \quad r_2 = \begin{cases} 0 & \text{для } T < 0, \\ x & \text{для } T \geq 0, \end{cases}$$

$x$ , мм - содержание воды в снежном покрове,  $r_1$ , мм/мес - поступление из атмосферы,  $r_2$ , мм/мес - водоотдача снежного покрова,  $R$ , мм/мес - слой осадков,  $T$ , °С - среднемесячная температура воздуха.

Для расчетов интенсивности суммарного испарения с поверхности водосбора в зависимости от степени его увлажнения использована модифицированная формула Будыко (Бабкин и др., 1986):

$$E = \begin{cases} 0 & \text{для } w \leq w_z, \\ E_0 \frac{w - w_z}{w_{max} - w_z} & \text{для } w_z < w < w_{max}, \\ E_0 & \text{для } w \geq w_{max}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $E$ , мм/мес - интенсивность суммарного испарения с поверхности водосбора,  $E_0$ , мм/мес - испаряемость,  $w$ , мм - влажность поверхностного слоя почвы зоны аэрации, имеющего глубину  $L$ ,  $w_{max}$ , мм - максимальное значение влажности почвы,  $w_z$ , мм - влажность завядания. Влажность поверхностного слоя почвы определялась с помощью уравнения:

$$\frac{dw}{dt} = r_3 - r_4 - E, \quad (3)$$

$$r_3 = \begin{cases} 0 & \text{для } T < 0, \\ \delta w & \text{для } T \geq 0, \end{cases} \quad r_4 = \begin{cases} 0 & \text{для } w < w_{max}, \\ (w - w_{max})/\Delta t & \text{для } w \geq w_{max}, \end{cases}$$

где  $r_3$  и  $r_4$ , мм/мес - соответственно приток и отток влаги при переувлажнении,  $\delta w$ , мм - пополнение влагозапаса поверхностного слоя почвы за время  $\Delta t$ , мес, рассчитываемое по соотношению, предложенному авторами модели EGMO (Беккер и др., 1988; Becker, Pftzner, 1987):

$$\delta w = \begin{cases} 0 & \text{для } T < 0, \\ (w_{max} - w) \cdot (1 - \exp \frac{-I \Delta t}{(w_{max} - w_{min})}) & \text{для } T \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $w_{max}$  и  $w_{min}$ , мм - максимальная и минимальная влажность почв, при которой формируется сток, т.е. происходит водоотдача избытка влаги почвой,  $I$ , мм/мес - поступление воды на поверхность водосбора, определяемое следующим образом:

$$I = \begin{cases} 0 & \text{для } T < 0, \\ R + r_2 + r_4 & \text{для } T \geq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Разница между поступлением воды на поверхность водосбора и пополнением влагозапаса поверхностного слоя почвы - слой водоотдачи  $y$ , мм/мес, определяемый формулой

$$y = \begin{cases} 0 & \text{для } w \leq w_{min}, \\ I - \delta w / \Delta t & \text{для } w_{min} < w < w_{max}, \\ I & \text{для } w \geq w_{max}. \end{cases} \quad (6)$$

С помощью уравнений, использующихся в модели EGMO [Becker, Pftzner, 1987], сток разделен на быструю (поверхностную и подповерхностную) и медленную (грунтовую) составляющие. Слой быстрого стока  $y_f$ , мм/мес, рассчитывался следующим образом:

$$y_f = y c_f, \quad (7)$$

где  $c_f$  - безразмерный коэффициент регулирования. Предполагалось, что за месяц быстрая компонента стока срабатывается полностью. Изменение емкости грунтового питания, формирующего медленную составляющую стока и имеющего более продолжительный период сработки, описано уравнением описано уравнением

$$\frac{dU}{dt} = y(1 - c_f) - y_s, \quad (8)$$

где  $U$ , мм - емкость грунтового питания,  $y_s$ , мм/мес - слой медленного (грунтового) стока, рассчитанный по уравнению

$$y_s = U \cdot k_s / \Delta t, \quad (9)$$

$k_s$  — безразмерный коэффициент сработки грунтового стока.

В процессе моделирования водосбор представляется в виде однородной имитирующей емкости, накапливающей поступающую воду и затем постепенно ее отдающей. Основными параметрами, определяющими форму гидрографа стока, являются коэффициент регулирования  $c_f$  в формулах (7) и (8), определяющий соотношение между поверхностным (быстрым) и грунтовым (медленным) соком, и коэффициент сработки грунтового стока  $k_s$  в формуле (9). В результате калибровки модели на ряде речных водосборов северо-запада России с площадями с площадью от 589 (р. Тигода - ст. Любань) до 281000 км<sup>2</sup> (Нева - д. Новосаратовка) с учетом особенности формирования стока на конкретных объектах получены эмпирические зависимости значения параметров  $c_f$  и  $k_s$  в зависимости от % озерности водосборов (Кондратьев С.А., Шмакова, 2005).

Ряд параметров модели задавался на основе опыта предшествующего моделирования стока в бассейне Ладожского озера (Кондратьев С.А., Бovyкин, 2000; Кондратьев, Шмакова, 2005). Так, значения параметров увлажнения почв  $w_{max}$ ,  $w_{min}$  и  $w_z$  для метрового слоя почв зоны аэрации принимались равными 330, 205 и 100 мм, соответственно. Глубина зоны аэрации поверхностного слоя почвы  $L$  принята равной 1.5 м. Среднемесячные значения  $E_0$  принимались в соответствии с результатами расчетов, выполненных для условий водосбора Онежского озера с учетом динамики дефицита влажности и температуры воздуха. В качестве входной информации об осадках и температуре воздуха использовались данные наблюдений на станциях, расположенных в районе исследований. Данных о расходах воды в притоках Онежского озера принимались в соответствии с результатами измерений на сети мониторинга Росгидромета.

Основой для проведения расчетов по моделям и создания прогностической оценки возможных изменений стока с водосбора Онежского озера в 21 веке выбран сценарий изменений климатических параметров ECHAM4/OPYC3, рассчитанный по модели общей циркуляции атмосферы и океана за период с 1861 года по 2100 год. Детальное описание модели, получившей индекс ECHAM-4, дано Л. Бенгтссоном (Bengtsson, 1997). Для адаптации сценария ECHAM4/OPYC3 к условиям изучаемого водосбора использован метод корректировки среднемесячных значений модельных климатических параметров с учетом особенностей гидроме-

теорологии рассматриваемого водосбора. Метод основан на использовании соотношений, связывающих значения измеренных климатических параметров и рассчитанных по модели общей циркуляции атмосферы.

Выполненные на основе гидрологической модели расчеты позволяют оценить изменения как внутригодовой, так и межгодовой динамики гидрологических характеристик изучаемого водосбора (водного эквивалента снежного покрова, испарения, увлажнения почв зоны аэрации, стока) с учетом возможного потепления в совокупности с изменением осадков в 21 веке. Возможное возникновение положительных температур воздуха в ноябре приведет к тому, что выпадающие осадки не будут формировать снежный покров в осенний период, как это было в период 1951-2000, а пойдут на увлажнение почвы и формирование стока. Сокращение продолжительности холодного периода с отрицательными температурами воздуха приведет к сокращению сроков накопления снеготалых вод и снижению их значений, несмотря на увеличение зимних осадков. Если в период инструментальных наблюдений значения максимальных снеготалых вод на водосборе составляли около 190 мм водного эквивалента, то по результатам расчетов следует ожидать их уменьшения до 146 мм в 2051 – 2100 гг., т. е. на 23% по отношению к исходному периоду.

Существенное возрастание температуры воздуха может явиться причиной значительного возрастания суммарного испарения. Согласно выполненным расчетам слой суммарного испарения может возрасти с 267 мм/год для периода 1951-2000 гг. до 302 и 340 мм/год, т.е. на 13 и 27 %, соответственно, для периодов 2001 – 2050 и 2051 – 2100 гг. Потепление в ноябре будет способствовать небольшому (до 3 %) возрастанию осенне-зимнего увлажнения почв зоны аэрации на водосборе, глубина которой принималась равной 1.5 м. Снижение летних осадков в совокупности с возрастанием температуры воздуха и испарения, возможно, приведет к снижению значений влажности почв на водосборе Онежского озера в летний период 2001 – 2050 и 2051 – 2100 гг., соответственно, на 5 и 12 % по отношению к интервалу времени 1951-2000 гг. Можно также предположить, что к концу 21 века произойдет смещение максимальных расходов весеннего половодья в более ранний период за счет предполагаемого потепления. Существенное увеличение суммарного испарения в теплый период года приведет к снижению межлетних расходов до 20% по отношению к исходному периоду и, возможно, к небольшому снижению (до 5 %) суммарного годового стока на изучаемой территории.

Таким образом, на основе анализа полученных результатов расчетов можно заключить, что если предполагаемые изменения климатических параметров в 21 веке на водосборе Онежского озера будут происходить в соответствии со сценарием ЕСНАМ4/ОРУС3, то вряд ли можно ожидать существенных изменений годового стока с водосбора и, соответственно, притока в озеро. Выполненные в настоящей работе расчеты показывают небольшое (до 5%) снижение суммарного годового стока к концу 21 века, несмотря на предполагаемое возрастание годового слоя осадков. Причиной может являться рост суммарного испарения в результате потепления, которое будет компенсировать возрастание слоя осадков.

По мнению авторов данного исследования, наиболее важные изменения водного режима водосбора (с точки зрения воздействия на будущую хозяйственную деятельность в регионе) связаны с внутригодовым перераспределением рассчитанных по гидрологической модели характеристик. Это возможное снижение

зимних снеготалых вод, существенное внутригодовое перераспределение стока за счет смещения весеннего половодья в более ранний период и снижение межлетнего стока, а так же увеличение осеннее - зимнего и уменьшение летнего увлажнения почв зоны аэрации на водосборе.

### Литература

1. Бабкин В.И. Методы определения испарения с водной поверхности и суши / В.И.М. Бабкин, А.П. Вершинин, В.В. Виноградов, В.С. Вуглинский. - Гидрометеорология. Серия: Гидрология суши, 1986, вып. I, 131 с.
2. Беккер А. Математическая модель процесса формирования дождевого стока с речного водосбора, предназначенная для использования в системе оперативного прогноза дождевых паводков / А. Беккер [и др.]. - Труды ГГИ, 1988, вып. 331, с. 3 - 16
3. Кондратьев С.А. Оценка возможных антропогенных изменений стока и выноса биогенных элементов с малых водосборов лесной зоны на основе математической модели. – Водные ресурсы, 1990, т.17, № 3, с. 24-32.
4. Кондратьев С.А. Влияние осадков и температуры воздуха на гидрологический режим системы водосбор – озеро (на примере оз. Красного) / С.А. Кондратьев, И.В. Бовыкин. Водные ресурсы, 2000, том 27, № 4, с. 416 – 423.
5. Кондратьев С.А. Влияние возможных климатических изменений на гидрологический режим системы водосбор-озеро / С.А. Кондратьев, И.В. Бовыкин. – Метеорология и гидрология, 2003, N10, с. 86-96.
6. Кондратьев С.А. Изучение формирования стока с речных водосборов методами математического моделирования (на примере бассейна Ладожского озера) / С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова. - Труды XII съезда РГО, СПб.: Наука, 2005, т.6, с. 99-104.
7. Мелешко В.П. Изучение возможных изменений климата с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана / В.П. Мелешко [и др.] // Изменения климата и их последствия. - С-Пб, 2002. - С. 13-36.
8. Becker A., Pfutzner B., 1987. EGMO - System approach and subroutines for river basin modelling. - Acta Hydrophys., v. 31, N 3-4, p. 125-141.
9. Bengtsson L., Numerical modeling of the Earth's Climate / Bengtsson L. /Publ. of Max-Planck Inst. for Meteorology, Hamburg, 1997. - 94 p.



ИЗУЧЕНИЕ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ФОТОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЦИАНОБАКТЕРИЙ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫХ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ БИОИНДИКАТОРОВ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ

<sup>1</sup>Кузьминов Ф. И., <sup>2</sup>Максимов Е. Г., <sup>3</sup>Горбунов М. Ю., <sup>1</sup>Фадеев В. В.

<sup>1</sup>Физический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова, Россия

<sup>2</sup>Биологический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова, Россия

<sup>3</sup>Institute of Marine and Coastal Sciences, Rutgers University, New Brunswick, USA

**Аннотация.** В работе исследовались флуоресцентные характеристики цианобактерий с использованием методов индукции и релаксации флуоресценции и нелинейной лазерной флуорометрии. Был определен набор фотофизических параметров, характеризующий состояние отдельных пигментов и фотосинтетического аппарата в целом. Была рассмотрена динамика изменения флуоресцентных параметров под влиянием факторов среды для трёх видов пресноводных цианобактерий *Synechocystis*, *Anabaena* и *Microcystis*, а также предложен метод определения концентрации цианобактерий в присутствии других видов фитопланктона. Обсуждаются перспективы использования цианобактерий в качестве флуоресцентных биоиндикаторов состояния водных экосистем.

### 1. Введение.

Цианобактерии относятся к прокариотическим организмам, большинство из которых способны к фотосинтезу. Основное отличие от зеленых, бурых и диатомовых водорослей заключается в наличии особых пигмент-белковых комплексов – фикобилисом, которые состоят из различных фикобилипротеинов (ФБП): фикоцианина (ФЦ), фикоэретрина (ФЭ) и аллофикоцианина (АФЦ) [1] и флуоресцируют в красной области спектра (620-680 нм). Благодаря наличию полос флуоресценции, дополнительных к полосе флуоресценции хлорофилла *a* (Хл-а), значительно увеличиваются возможности флуоресцентной спектроскопии в изучении фотофизических процессов в этих организмах и их использовании как флуоресцентных биоиндикаторов состояния экосистемы.

Это особенно важно в связи с еще одной особенностью цианобактерий – своеобразием протекания фазы «цветения» в их жизненном цикле. Данный процесс представляет собой резкий рост численности цианобактерий в водоеме за несколько дней, вызванный благоприятными условиями (оптимальной температурой, наличием достаточного минерального питания и др.). Такой рост не может поддерживаться популяцией на протяжении долго срока, и обычно через 1-2 недели они погибают. Однако если условия позволяют, то вскоре может начаться новый рост. Основные семейства цианобактерий ответственные за цветение по всему миру – это *Microcystis*, *Anabaena* и *Aphanizomenon*. Еще одной неприятной особенностью «цветения» является то, что около половины видов цианобактерий выделяют токсины, что негативно сказывается на флоре и фауне в непосредственной близости от очага «цветения», поэтому задача своевременного предсказания «цветения» цианобактерий является одной из приоритетных в биоиндикации.

Сложность фотофизических процессов в фотосинтезирующих организмах и, в частности, в цианобактериях, требует привлечения новых подходов для их

изучения и контроля. В данной работе используется подход, основанный на совместном применении метода индукции и релаксации флуоресценции (Fluorescence Induction and Relaxation, FIRE) [2], который можно рассматривать как более современную версию метода Fast Repetition Rate (FRR) [3], и метода нелинейной лазерной флуорометрии (НЛФ), в основе которого лежит определение фотофизических параметров из кривой насыщения флуоресценции флорофора [4]. Совместное применение этих двух подходов позволяет определять фотофизические параметры как клетки в целом (сечение фотосистемы 2 (ФС2), переменную флуоресценцию, скорости электронного транспорта между фотосистемами, величину нефотохимического тушения и др), так и индивидуальные характеристики отдельных пигментов (сечение поглощения, время жизни возбужденного состояния, константы скорости переноса энергии, включая скорость синглет-синглетной аннигиляции).

В данной работе анализировались флуоресцентные характеристики трёх видов пресноводных цианобактерий: *Synechocystis*, *Anabaena* и *Microcystis*. Были определены фотофизические параметры цианобактерии *Synechocystis* и двух ее мутантов с применением методов НЛФ и FIRE. На основе результатов измерений предложена методика определения концентрации цианобактерий, в том числе на фоне флуоресценции других компонентов фитопланктона - микроводорослей.

## 2. Материалы, методы и аппаратура.

### 2.1. Объекты.

В качестве объектов использовались: цианобактерии *Synechocystis sp. 6803*, *Anabaena flos-aquae* и *Microcystis aeruginosa* и, для сравнения, диатомовая водоросль *Thalassiosira pseudonana*, а также СК-мутант (с отсутствующим ФЦ) и PAL-мутант (с отсутствующими ФЦ и АФЦ) цианобактерии *Synechocystis 6803*. Культуры выращивались в среде BG-11 в стационарных условиях.

### 2.2 Методы и аппаратура.

**Метод индукции и релаксации флуоресценции (FIRE)** [2] основан на измерении интенсивности флуоресценции, возбуждаемой импульсами света с контролируемой интенсивностью, длительностью и скважностью (Рис 1).

Анализ экспериментальных кривых позволяет определять большой набор фотофизических параметров фотосинтезирующего организма, включающий в себя:

$F_v / F_m$	максимальный квантовый выход фотохимии в фотосистеме 2 (ФС2);
$\sigma_{PSII}$	функциональное сечение поглощение ФС2;
$p$	“параметр связанности” - определяет перенос энергии между отдельными фотосинтетическими единицами;
$\tau_{stf}$	время электронного транспорта на акцепторной стороне ФС2 (окисление Qa);
$\tau_{mtf}$	время электронного транспорта между ФС1 и ФС2;
$P_{max}$	максимальная скорость электронного транспорта.

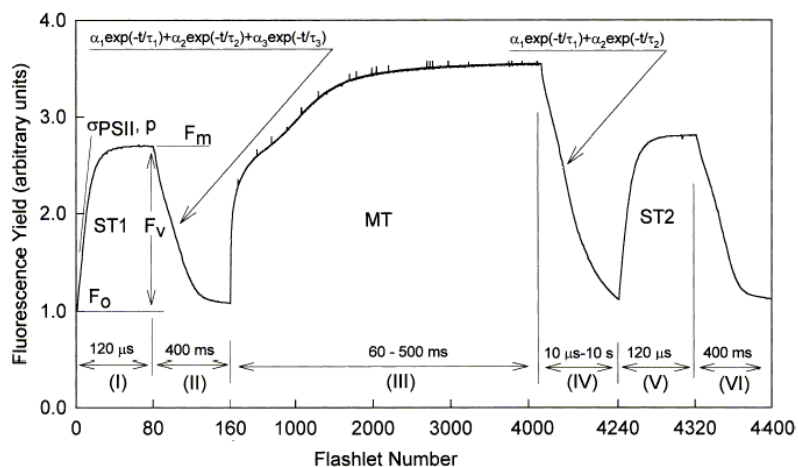


Рис. 1. Типичная кривая индукции и релаксации флуоресценции

Эксперименты с использованием метода FIRE выполнялись на приборе, описание которого дано в [2]. Для возбуждения флуоресценции использовались светодиоды с длинами волн 440 нм (возбуждение хлорофилла *a*) и 590 нм (возбуждение ФБП).

**Метод нелинейной лазерной флуорометрии** [4] заключается в определении фотофизических параметров из кривой насыщения (нелинейной зависимости флуоресценции флуорофора от интенсивности возбуждающего излучения). Для концентраций  $n_i$  молекул в возбужденном состоянии для каждого из трёх фигурирующих в нашей задаче флуорофоров можно записать следующую систему уравнений:

$$\frac{dn_1(t,r)}{dt} = F(t,r) \cdot \sigma_1 \cdot (1 - n_1(t,r)) - \frac{n_1(t,r)}{\tau_1} - (\gamma_{01}) \cdot n_1^2(t,r) - k_{12}n_1(t,r) \cdot (1 - n_2(t,r)); \quad (1)$$

$$\frac{dn_2(t,r)}{dt} = F(t,r) \cdot \sigma_2 \cdot (1 - n_2(t,r)) + k_{12}n_1(t,r) \cdot (1 - n_2(t,r)) - \frac{n_2(t,r)}{\tau_2} - (\gamma_{02}) \cdot n_2^2(t,r) - k_{23}n_2(t,r) \cdot (1 - n_3(t,r));$$

$$\frac{dn_3(t,r)}{dt} = F(t,r) \cdot \sigma_3 \cdot (1 - n_3(t,r)) + k_{23}n_2(t,r) \cdot (1 - n_3(t,r)) - \frac{n_3(t,r)}{\tau_3} - (\gamma_{03}) \cdot n_3^2(t,r);$$

где  $\sigma_i$  – сечение возбуждения,  $\tau_i$  – время линейной релаксации,  $k_{ij}$  – константа скорости переноса между  $i$  и  $j$  флуорофорами,  $\gamma_{0i}$  – максимальная скорость синглет-синглетной аннигиляции,  $i$ : 1 – ФЦ, 2 – АФЦ, 3 – хлорофилл *a*.

Полное число фотонов флуоресценции из единицы объёма среды определяется выражением (2), и для высоких значений плотностей потока фотонов (интенсивности) возбуждающего излучения  $N_{fl}$  нелинейно зависит от  $F$  (Рис. 2).

$$N_{fl}^i = k_{fl} \int n_i(k_{ij}, \sigma_i, \gamma_{0i}, \tau_i, F) dt \quad (2),$$

где  $k_{fl}$  – скорость радиационной (флуоресцентной) релаксации возбужденного состояния.

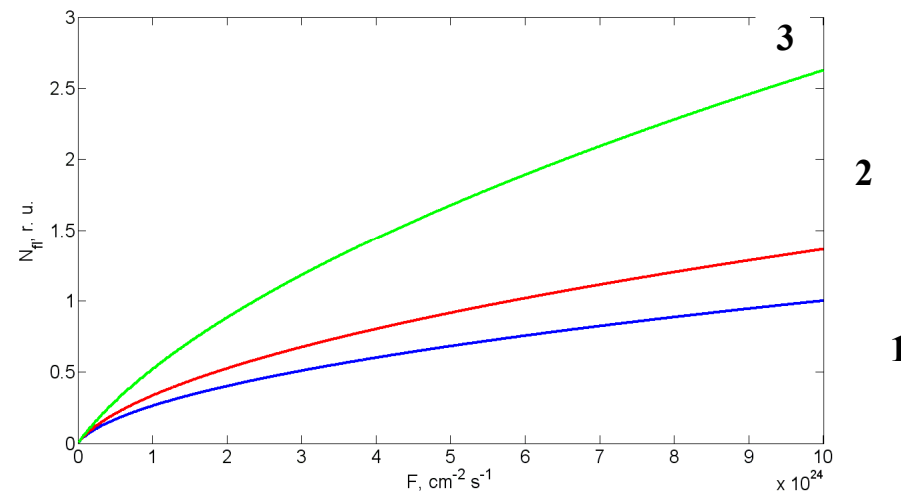


Рис 2. Типичные кривые насыщения для ФЦ (1), АФЦ (2) и Хл а (3).

Зависимость  $N_{fl}(F)$  называется кривой насыщения. Ее характеристики определяются перечисленными выше фотофизическими параметрами флуорофора ( $k_{ij}, \sigma_i, \gamma_{0i}, \tau_i$ ). Таким образом, решая соответствующую обратную задачу, можно определить эти параметры. Как показано в [5], кривая насыщения фотосинтезирующих организмов может быть описана моделью, содержащей меньшее количество параметров, чем исходная модель (1):

$$\frac{dn(t,r)}{dt} = F(t,r) \cdot \sigma \cdot (1 - n(t,r)) - \frac{n(t,r)}{\tau} - (\gamma_{0}) \cdot n^2(t,r); \quad (3)$$

где  $n$  – относительная концентрация молекул Хл-а в возбужденном состоянии,  $\sigma$  – обобщенное сечение возбуждения молекулы Хл-а, включающее в себя как прямое поглощение возбуждающего излучения молекулой Хл-а, так и перенос энергии на неё со вспомогательных пигментов,  $\tau$  – время линейной релаксации молекул Хл-а, определяемое вероятностями (скоростями) излучательного и безизлучательных внутримолекулярных переходов и скоростью переноса энергии на реакционный центр,  $\gamma_{0}$  – максимальная скорость синглет-синглетной аннигиляции молекул Хл-а. При этом может быть получено приближённое аналитическое выражение для кривой насыщения флуоресценции, в котором фигурируют параметры  $\Phi_0 = N_{fl}/N_{RS}$  ( $N_{RS}$  – число фотонов КР воды, регистрируемых из того же объёма среды, что и флуоресценция),  $A = \tau^2 \sigma \gamma_{0}$ ,  $B = \tau \sigma$ ,  $C = \gamma_{0}$ , которые вместе или по

отдельности могут использоваться в качестве индикаторов физиологического состояния организма и его изменения под влиянием факторов среды.

Эксперименты с использованием НЛФ выполнялись на лазерном спектрометре, характеризующемся следующими основными параметрами:

- длины волн возбуждающего излучения, нм: 1320, 1064, 660, 589, 532, 440, 355, 330, 295, 266;
- длительность импульса, нс: 10 ... 30 (в зависимости от длины волны);
- энергия в импульсе: от нескольких мДж в УФ диапазоне до десятков мДж в видимом и инфракрасном диапазонах;
- частота следования импульсов: 10 Гц;
- плотность потока фотонов в импульсе: до  $10^{26}$  фотонов/см<sup>2</sup>с<sup>-1</sup>;
- регистрация спектров стробируемым оптическим многоканальным анализатором УФ и видимого диапазонов (длительность строба 10 нс, шаг изменения времени задержки строба относительно лазерного импульса 2.5 нс).

Традиционные флуоресцентные измерения проводились на спектрофлуориметре Aminco Bowman (США). Образцы помещались в 10 мм кварцевые кюветы.

### 3. Результаты и обсуждение.

#### 3.1. Определение фотофизических параметров с использованием НЛФ и FIRE для дикого типа и мутантов *Synechocystis sp. PCC6803*.

В таблицах 1 и 2 представлены результаты определения фотофизических параметров с помощью двух различных методик - НЛФ и FIRE.

Таблица 1. Результаты НЛФ для дикого типа *Synechocystis sp. PCC6803* и его мутантов (СК and PAL). Результаты представлены только для фотофизических параметров Хл-а.  $B = \sigma \tau$ ,  $C = \gamma n_0 \tau$ . Длина волны лазерного возбуждения – 532 нм.

Образец/Параметр	B, см <sup>2</sup> с	C
Дикий тип	$8,8 \cdot 10^{-26}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$
СК	$2,3 \cdot 10^{-26}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$
PAL	$1,8 \cdot 10^{-26}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$

Таблица 2. Параметры, определенные с использованием FIRE, для дикого типа *Synechocystis sp. PCC6803* и его мутантов (СК and PAL). Длина волны возбуждения (светодиод) – 590 нм.

Образец	Fv/Fm	$\sigma_{PSII}$ , см <sup>2</sup>	$\tau_{stf}$ , с
Дикий	0,42	$2,6 \cdot 10^{-14}$	$1,1 \cdot 10^3$
СК	0,5	$0,7 \cdot 10^{-14}$	$0,8 \cdot 10^3$
PAL	0,32	$0,5 \cdot 10^{-14}$	$0,9 \cdot 10^3$

Мы видим, что параметры B и  $\sigma_{PSII}$  значительно варьируются от образца к образцу, изменяясь при этом в одном направлении. Для дикого типа эти параметры имеют наибольшие значения, для мутанта PAL – наименьшие. Это можно объяснить следующим образом: для возбуждения образцов мы используем длины волн (532 нм и 589 нм), которые преимущественно поглощаются фикобилисомой. Та-

ким образом, мутанты, у которых отсутствует часть или вся фикобилинная антенна, поглощают хуже, что выражается в увеличенном эффективном сечении поглощения фотосистемы 2. Параметр B является произведением двух параметров – времени линейной релаксации ( $\tau$ ) и сечения поглощения Хл-а ( $\sigma$ ). Если мы предположим, что время линейной релаксации хлорофилла *a* не варьируется от образца к образцу (что должно выполняться в рамках данного эксперимента с достаточной точностью, поскольку внутренняя, хлорофилл содержащая антенна, не подвергалась мутациям, и, следовательно должна быть одинакова у всех образцов), то получим, что поведение параметра B в точности повторяет поведение  $\sigma_{PSII}$ .

Важно отметить, что параметры, определяемые с помощью НЛФ и FIRE чувствительны к таким внешним воздействиям, как избыточная освещенность, присутствие в воде ингибиторов и т. д. В частности, в работе [6] нами была показана динамика изменения параметров FIRE в присутствии в воде ионов тяжелых металлов (ТМ) ( $Cd^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  и  $Pb^{2+}$ ) для зооксантелл. Результаты говорят о том, что при наличии в воде ионов тяжелых металлов прежде всего уменьшается переменная флуоресценция (Fv/Fm) и увеличиваются времена электронного транспорта ( $\tau_{stf}$  и  $\tau_{mf}$ ), что говорит о снижении фотосинтетической активности организмов. Результаты измерений с помощью НЛФ показывают, что очень чувствительным к воздействию внешних ингибиторов является время линейной релаксации – происходит увеличение параметра, величина которого зависит от концентрации металла в воде. Что касается избыточного освещения, то следует ожидать прежде всего изменений в переменной флуоресценции и сечении ФС2 для FIRE и времени линейной релаксации и сечения поглощения Хл-а и других пигментов для НЛФ, поскольку фотосинтезирующий организм будет стремиться уменьшить количество поглощаемого света за счет механизмов фотоадаптации, в частности, нефотохимического тушения. Результаты по механизму нефотохимического тушения у цианобактерий представлены в работе [7]. Таким образом, параметры, определяемые методами НЛФ и FIRE, чувствительны к различным факторам среды и могут использоваться в биоиндикации состояния водных экосистем.

#### 3.2. Сравнительная характеристика флуоресцентных параметров различных видов пресноводных цианобактерий и диатомовой водоросли.

Спектры испускания флуоресценции при возбуждении на 440 нм (возбуждается хлорофилл *a*) и 590 нм (возбуждается в основном фикоцианин) для цианобактерий и диатомовой водоросли представлены на рис 3.

Как видно из графиков, цианобактерии лучше возбуждаются оранжевым светом, а диатомовые, как и другие фотосинтезирующие организмы без фикобилисомы, – синим. Этот факт можно использовать для определения концентрации цианобактерий *in situ* даже при наличии других видов фитопланктона.

Для решения данной задачи на FIRE флуориметре были измерены фотофизические параметры вышеперечисленных цианобактерий и диатомовой водоросли при возбуждении образцов на 440 нм и 590 нм. Данные приведены в таблице 3. Как видно, параметры Fm, F<sub>0</sub> и  $\sigma_{PSII}$  зависят от длины волны возбуждения. Это достаточно очевидный факт, поскольку Fm и F<sub>0</sub> пропорциональны флуоресценции образцов, которая, как мы видим на рис. 3, зависит от длины волны возбуждения. Сечение имеет такую зависимость,

поскольку при возбуждении синим и оранжевым светом роль основных светосборщиков для фотосистемы 2 играют различные пигменты. Однако для характеристики концентрации необходимо лишь значение  $F_m$ , поскольку оно описывает максимальную флуоресценцию образца и, следовательно, пропорционально концентрации пигментов, флуоресцирующих на длине волны регистрации.

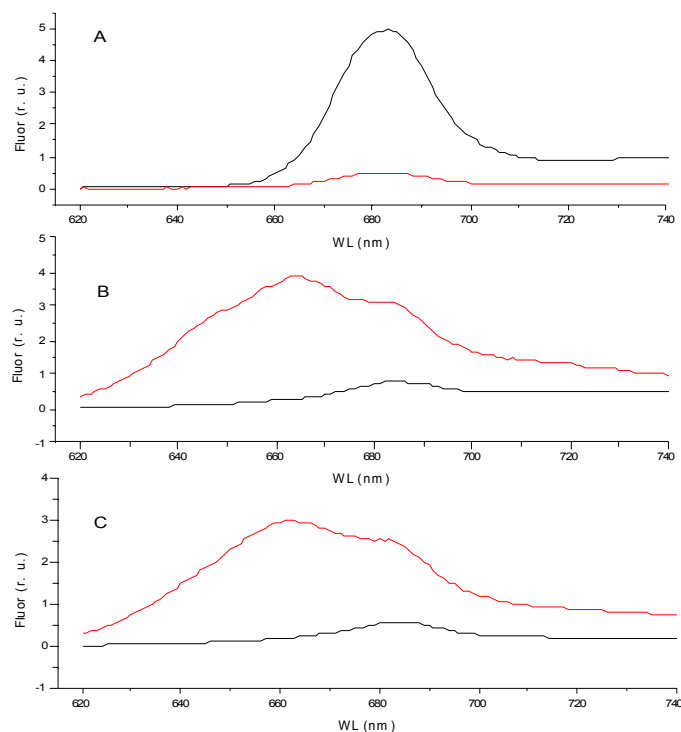


Рис 3. Спектры испускания флуоресценции и диатомовой водоросли *Thalassiosira pseudonana* (A) и цианобактерий *Anabaena* (B) и *Synechocystis* (C) при возбуждении на 440 нм (черный) и 590 нм (серый).

Таблица 3. Результаты определения параметров FIRE для цианобактерий *Synechocystis* sp. 6803, *Anabaena flos-aquae* и *Microcystis aeruginosa* и диатомовой водоросли *Thalassiosira pseudonana*. В скобках рядом с названием культуры указана длина волны возбуждения.

	$F_0$	$F_m$	$\sigma$ (A <sup>2</sup> )	$\rho$
<i>Anabaena</i> (440 нм)	29,4	35,6	40	0,34
<i>Anabaena</i> (590 нм)	17	55	88	0,09
<i>Microcystis</i> (440 нм)	1,5	3	44	0,5
<i>Microcystis</i> (590 нм)	1,9	3,1	102	0,4
<i>Synechocystis</i> (440 нм)	13,7	28,4	57	0,13
<i>Synechocystis</i> (590 нм)	29,1	36,7	98	0,23
<i>Thalassiosira</i> (440 нм)	365	832	37	0,2
<i>Thalassiosira</i> (590 нм)	15	30,4	326	0,3

Таблица 4. Отношение интенсивностей максимальной флуоресценции при возбуждении на 590 нм и 440 нм для цианобактерий *Synechocystis* sp. 6803, *Anabaena flos-aquae* и *Microcystis aeruginosa* и диатомовой водоросли *Thalassiosira pseudonana*.

	<i>Anabaena</i>	<i>Microcystis</i>	<i>Synechocystis</i>	<i>Thalassiosira</i>
$F_m(440)/$	0,6	0,98	0,7	27,3
$F_m(590)$				

### 3.3. Методика определения концентрации цианобактерий при возбуждении на двух различных длинах волн.

Как видно из таблицы 4, отношение значений  $F_m$  при возбуждении синим и оранжевым светом для цианобактерий близко к 1, а для диатомовой водоросли значительно превосходит единицу и составляет приблизительно 30 (регистрация сигнала флуоресценции происходила на длине волны 680 нм). Данный факт можно использовать для того, чтобы оценивать количество цианобактерий в водоеме. Допустим, в лабораторных условиях мы смогли установить, что 1000 клеток конкретного вида цианобактерий дают значения  $F_m$  при возбуждении на 440 нм и 590 нм, равные  $X_{440}$  и  $X_{590}$ , соответственно, а 1000 клеток диатомовой (или любой другой) водоросли имеют, соответственно, значения  $Y_{440}$  и  $Y_{590}$ . Тогда для общих сигналов, регистрируемых при возбуждении объема среды, содержащего  $m$  клеток цианобактерий и  $n$  клеток водоросли, на 440 нм и 590 нм получим следующие выражения:

$$\begin{aligned} A_{440} &= mX_{440} + nY_{440} \\ A_{590} &= mX_{590} + nY_{590} \end{aligned} \quad (4)$$

Отсюда можно получить следующие выражения для m и n:

$$\begin{aligned} m &= \frac{A_{440}Y_{590} - A_{590}Y_{440}}{X_{440}Y_{590} - X_{590}Y_{440}} \\ n &= \frac{A_{440}X_{590} - A_{590}X_{440}}{Y_{440}X_{590} - Y_{590}X_{440}} \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, возбуждение на двух длинах волн позволяет нам определять концентрацию цианобактерий в водоеме даже при наличии других видов фотосинтезирующих микроорганизмов. Более того, поскольку важно следить за динамикой роста численности цианобактерий, то можно записать следующее выражение для отношения сигнала при возбуждении на различных длинах волн (будем считать, что численность микроводорослей (не цианобактерий) n остается на одном уровне, а отношение флуоресценции цианобактерий при возбуждении на длинах волн 440 нм и 590 нм равно единице):

$$\frac{A_{590}}{A_{440}} (m) = \frac{m+n \frac{Y_{440}}{X_{440}}}{m+n \frac{Y_{590}}{X_{440}}} \quad (6)$$

Видно, что даже при условии, что концентрация цианобактерий меньше, чем концентрация других водорослей, мы уверенно регистрируем на ранних стадиях рост численности по росту отношения флуоресценции, даже не зная конкретных параметров флуоресценции для цианобактерий или других фотосинтезирующих организмов.

Таким образом, предложена методика расчета концентрации цианобактерий при известных флуоресцентных параметрах для данного вида, а также информации о конкурирующих видах. Кроме того, показано, что для получения информации о динамике роста численности популяции цианобактерий можно в первом приближении использовать лишь отношение сигналов флуоресценции, получаемых при возбуждении на разных длинах волн.

#### 4. Заключение.

Получены первые результаты по исследованию фотофизических свойств цианобактерий с использованием одновременно двух методов флуоресцентной спектроскопии – нелинейной лазерной флуорометрии и метода индукции и релаксации флуоресценции. Определены фотофизические параметры Хл-а и ФС2 при возбуждении на 532 нм и 590 нм. Предложена методика расчета концентрации цианобактерий (а также конкурирующих видов фотосинтезирующих организмов в составе фитопланктона) при известных флуоресцентных параметрах для данного вида. Показано, что для получения информации о динамике численности популяции цианобактерий можно в первом приближении использовать лишь отношение сигналов флуоресценции, получаемых при возбуждении на разных длинах волн. Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 08-05-00892 и 09-05-92515-ИК).

#### Литература

1. Bacon Ke. Photosynthesis: Photobiochemistry and photobiophysics. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 2001, pp. 251-270.
2. Gorbunov M., Falkowski P. Fluorescence Induction And Relaxation (FIRE) Technique and Instrumentation for Monitoring Photosynthetic Processes and Primary Production in Aquatic Ecosystems. Photosynthesis: Fundamental Aspects to Global Perspectives. A. van der Est and D. Bruce Eds, 2005, pp. 1029-1031.
3. Kolber, Z. S., Prasil, O. & Falkowski, P. G. Biochim. Biophys. Acta – Bioenergetics, 1998, 1367, pp. 88–106.
4. Fadeev V.V., Dolenko T.A., Filippova E.M., Chubarov V.V. Saturation spectroscopy as a method for determining the photophysical parameters of complicated organic compounds. Optics Communications, 1999, 166, pp.25-33.
5. Д.В. Маслов, Е.Е. Остроумов, В.В. Фадеев. Флуориметрия насыщения сложных органических соединений с высокой локальной концентрацией флуорофоров (на примере фитопланктона). Квантовая электроника, 2006, т.36, №2, с.163-168.
6. T. Gostev, F. Kuzminov, M. Gorbunov, V. Fadeev. Phytoplankton as a fluorescent bioindicator of ecotoxicants in natural waters. Proceedings of SPIE, vol. 7715 (SPIE, Bellingham, WA 2010), 771520.
7. Kouzminov, F. I., Maximov, E. G., Gorbunov, M. Y., Fadeev, V. V. Fluorescent diagnostics of cyanobacteria. Proceedings of SPIE, vol. 7715 (SPIE, Bellingham, WA 2010) 771521.

#### ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАСЕЛЕНИЯ И ПРИРОДЫ В ТВЕРСКОМ ВЕРХНЕВОЛЖЬЕ: ОСОБЫЕ СТРУКТУРЫ ТЕРРИТОРИИ

Н.Б.Култашев

ТвГУ

Наложение на природную инфраструктуру территории объектов производственной и социально-бытовой инфраструктуры привело к формированию ряда ключевых инфраструктурных территориальных комплексов. Нарушения в их функционировании - источник риска многофакторных чрезвычайных ситуаций (ЧС), возникновения потенциальных зон ЧС.

Пространство жизни человека в пределах Тверского Верхневолжья к настоящему времени поляризовано: прослеживается тенденция к дальнейшей концентрации населения, получившая сильный импульс на рубеже XIX-XX вв. Пространственная и социально-бытовая инфраструктура поддерживает состояние равновесности в системе территориальной организации (ТО) человека и природы. Ее пространство (посредник между человеком и природой) организовано так, что в нем сложились активно действующие очаги, создающие: ныне – напряженность в территориальных системах жизни человека; в будущем – возможные ареалы bifurкаций, которые непредсказуемым образом могут изменить всю Тверскую территориальную социально-экономическую систему (ТСЭС). В достаточно общем виде инфраструктура жизни населения Тверской области представлена объектами:

- локального значения, являющимися «буфером» во взаимодействии непосредственно человека и среды (жилище, места приложения труда и отдыха и др.);

- локального значения, но оказывающими сильное воздействие турбулентного характера на миграцию веществ в среде жизни, т.е. производственными, вовлекающими в свою сферу большие массы вещества и перераспределяющими потоки энергии (химические производства, строительная индустрия, пищевая промышленность и т.д.). Ими, в принципе, могут стать любые производства при определенном состоянии технологий. Соответствующие ситуации потенциально присущи гг. Тверь, Ржев, В. Волочек, Торжок и др. Важно то, что сочетания таких объектов - промышленные пункты, группы, узлы - способны создавать кумулятивный эффект воздействия на среду и, более того, взаимодействовать между собой, создавая обширные зоны потенциальных ЧС, подвергающие опасности воздействия поражающих факторов большие группы населения;

- локализованными в своем местонахождении, но выступающими узлами - регуляторами процессов и связей больших территорий (гидротехнические сооружения, крупные электростанции Калининская АЭС, Конаковская ГРЭС, и т.д.);

- протяженными, осуществляющими взаимосвязь территориальных групп населения, промышленных узлов, сельских поселений, на больших пространствах, носителями связности территории собственно Верхневолжья и других регионов (транспортные магистрали: железные и автомобильные дороги, трубопроводы; энергетические системы, и т.д.).

Любой из объектов инфраструктуры может стать источником ЧС за счет аварий на нем. Особо важен при этом вопрос о последствиях событий, приводящих к риску возникновения многофакторных ЧС. Неравнозначны они и по возможности прогнозирования.

Существенно, что стационарный характер воздействия многих из перечисленных объектов на среду привел к формированию водных и воздушных техногенных геохимических аномалий, а также геохимических аномалий в почвенном покрове. Интенсивность их проявления пульсирует в пространстве-времени территории. Особенно это касается Тверского, Старицко-Ржевского, Кимрско-Калязинского, Весьегонско-Краснохолмского микрорайонов, Ивановского, Угличского, Рыбинского водохранилищ.

Вероятность возникновения зон, подверженных риску возможных многофакторных ЧС, их масштабов, помимо индивидуальных особенностей объектов (уровень изношенности основных фондов; характер технологических процессов и т.д.) зависит от возможностей территории компенсировать неблагоприятные воздействия - от ее устойчивости. Последняя связана с представлением о предельной емкости освоения: любая территория при определенном уровне развития инфраструктуры, ее типе характеризуется некоторым предельным показателем плотности населения. Его превышение означает потерю способности восстанавливать равновесие без коренного преобразования инфраструктуры.

Для Центра Русской равнины при типе освоения, характерным для Тверской области к началу 60-х гг. XX в, порог такого состояния, видимо, связан со средней плотностью населения 20-25 чел на кв. км. Ранее всего он был преодолен на территориях Москвы и Московской области; начиная с 30-х гг. - на юге Центрального промышленного района. Более высокая плотность населения была компенсирована реорганизацией инфраструктуры. Тем не менее, превышение этого порога вле-

чет повышение меры хаотичности в воздействии на среду. Последствия известны: неспособность природы нейтрализовать воздействие с физической, химической, биологической точек зрения, возникновение геохимических аномалий. С другой стороны, нарушается сложившаяся связность процессов в природной системе. Это - предпосылка возможного бифуркационного развития. Согласно современным представлениям, в такой направленности может быть выделена регулярная компонента, соответственно, поведение системы определенным образом может быть предсказано. Однако, для этого нужны целенаправленные исследования.

Тверская область в этом смысле оказывается в противоречивом состоянии: с начала XXв. и до конца 50-х годов (исключая годы войны и послевоенные) плотность населения в ней была на грани критической. Однако, высокая доля сельского населения (следовательно, достаточно равномерное расселение по территории), отсутствие значительных капиталовложений в территорию обусловили медленное эволюционное развитие без значительных нарушений природного равновесия. Ныне ситуация изменилась. С начала 60-х гг. экономическое положение области существенно не изменилось. Однако, изменение социальных условий в стране привели к тому, что при некотором снижении средней плотности населения в области сложились диспропорции в системе расселения: этот показатель близок к 100 чел на кв. км в Тверском микрорайоне соответствует критическому в Цнинско-Мстинском, превышает среднюю на территории Ржевского, Торжокского, Кимрского административных районов, а также Спировского района. Во всех остальных случаях он значительно ниже (вплоть до 4 чел на кв. км в Пеновском районе). Такая перегруппировка населения в пространстве в относительно короткий срок неизбежно означает интенсификацию взаимодействия с природой, реорганизацию геосистемной связи и ее пространства в ограниченном числе мест, связанных с историческим ядром территории и Цнинско-Мстинским микрорайоном. Особую группу проблем создает возможность загрязнения отходами деятельности КАЭС через поверхностный и подземный стоки территорий в Мстинско-Бежецком микрорайоне, в т.ч. верхнем течении р. Мсты.

Вместе с тем, неясно, может ли вообще быть превышен современный порог средней плотности населения в Тверском Верхневолжье ввиду его абсолютно водораздельного положения на Русской равнине и ввиду того, что значительная часть его территории (Валдайская возвышенность) практически исключительно - зона элювиальных ландшафтов.

Все это - лишь одна сторона проблемы. Реальное ее содержание заключается в том, что с середины 50-х годов критические состояния нагрузок на территорию Тверской области нельзя рассматривать вне контекста ее положения в Московском Столичном регионе - именно с этого времени происходит активная интеграция области в систему Московской агломерации, интенсификация воздействия последней на территорию Тверского Верхневолжья за счет ее включения в ритмику жизни г. Москвы.

Надежность функционирования инфраструктурного комплекса определяется каркасом объектов, в т.ч.: общим уклоном местности с запада и северо-запада на юг и северо-восток; простираем р. Волги в пределах области; размещением гидротехнических сооружений; полимагистралью Москва - С-Петербург в пределах области; пространственной структурой Тверского микрорайона и прилегающих к нему территорий (треугольник, ограничиваемый линиями: Кимры - Тверь -

Торжок, Торжок-Ржев, Ржев - Конаково – Кимры). Соответственно в поле первоочередного внимания выдвигаются:

- промышленные и транспортные узлы и центры - гг. Тверь, Бологое, Ржев, В. Волочек, Торжок, Кимры, Удомля;
- территориальная система Тверского микрорайона в целом (гг. Тверь и Конаково Клинский и Конаковский административные районы);
- пространство названного "треугольника".

Особое внимание (но с других позиций) при разработке комплексов мероприятий по предупреждению ЧС должно быть уделено Цнинско-Мстинскому и Осташковско-Селижаровскому микрорайону.

Все названные территории выполняют свои специфические функции в ТСЭС области, дополняют друг друга. Они же – ключевые в ней: сильные отклонения в функционировании какой-либо из них скажутся на системе в целом.

Кроме общего простираения рельефа и каркаса р. Волги, определяющих основные направления водных геохимических потоков, в структуре ТО жизни населения области важное значение имеет пространственная ось от г. Бологое на Тверь, исторически сыгравшая объединительную роль для взаимодополняющих экономически активных территорий, и ныне выполняющая функции соединения микрорайонов. Она связывает в пределах области крупнейшие центры действия, содержащие в себе плохо измеримый высокой степени концентрации энергетический потенциал Конаковской ГРЭС, г. Тверь и КАЭС. Эти центры-поставщики в окружающую среду рассеиваемой (после концентрации) энергии, действующие непрерывно. Такой тип воздействия на объекты, обуславливающий серьезные изменения в них, исследуется в теории сложных систем как эффект Бенара. Даже при эволюционном развитии системы ТО эти центры действия постоянно меняют геосистему человека, условия и факторы его выживания. Трудно говорить о вероятных последствиях при возможно неблагоприятных сценариях развития.

Дальнейшая концентрация энергетического потенциала на линии Конаково-Тверь-КАЭС - предпосылка трансформации вещественных потоков и, соответственно, сложившегося относительного равновесия в геосистеме человека. Любые проекты, предполагаемые для осуществления в этой полосе, должны проходить тщательную экспертизу.

Более детально, исходя из особенностей ТСЭС Тверского Верхневолжья, на данном уровне знания о ней в качестве ключевых (особенных) структур территории можно назвать:

1. Котловины Верхневолжских озер и оз. Селигер.
2. «Седловину» Вышневолоцкого водохранилища.
3. Район г.В. Волочек - пос. Выползово - г. Бологое - г. Удомля (КАЭС).
4. г. Тверь и Тверской микрорайон.
5. Узел трубопроводов и магистралей в районе г. Торжка.
6. г. Ржев как промышленный центр и транспортный узел, Старицко-Ржевский микрорайон как территорию перспективного развития.
7. Пространство гидротехнических сооружений.
8. Полимагистраль Москва-С-Петербург как таковую и как практически единственный пока канал интегративного взаимодействия Тверской области и Московского Столичного региона.

Спонтанно возникшие ЧС на этих территориях или целенаправленное воздействие на них могут дезорганизовать жизнедеятельность не только области в целом, но и межрегиональное взаимодействие на территории Европейской части РФ на северо-запад и запад от Москвы (прежде всего в пространстве Москва-С-Петербург, а также в пространстве взаимодействия Центр России - Прибалтика и Беларусь, Северо-Запад и Центр России - южные регионы Европейской России).

Более детальное изучение механизмов функционирования ТСЭС Тверского Верхневолжья и ее природной основы, понимаемой как иерархия ландшафтно-геохимических систем, должно привести к выделению других ключевых структур и к локализации ключевых элементов ТО в рамках названных.

Работа выполнена при поддержке МЧС России.

#### СИСТЕМНАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ТВЕРСКОГО ВЕРХНЕВОЛЖЬЯ

Н.Б.Култашев, Н.Н.Тищенко

*ТвГУ*

1. Природная среда жизни населения Тверской области существует как территориально организованная совокупность ландшафтно-геохимических систем (ЛГС). Их единство обеспечивается миграционной структурой гидрохимического стока с Валдайской возвышенности, тектоническим строением территории, единством происхождения чехла четвертичных отложений, геоэкологической историей. В масштабе пространства области ЛГС представлены частями геохимических арен (по М.А. Глазковской): наиболее полно – Верхневолжской, соответствующей бассейну Верхней Волги в пределах области; Рыбинской, соответствующей бассейну р. Мологи; Прибалтийской на основе бассейна верховьев р. Зап. Двины и ареалами Великоозерской, связанной со стоком в оз. Ильмень по бассейну р. Мсты, а также по притокам р. Ловать. Каждой из арен соответствуют тектонически обусловленные геологические структуры, перекрытые чехлом четвертичных отложений. Гидрохимический сток в границах каждой из арен независим друг от друга. Одновременно он сопрягает ЛГС более низкого иерархического уровня в пределах арен переносом химических элементов. Источником мигрантов выступают, прежде всего, породы, слагающие ландшафты водораздельных поверхностей Валдайской возвышенности, привнос их с осадками из-за пределов области, а также техногенное загрязнение в пределах области и на сопредельных территориях.

Ход ландшафтно-геохимических процессов зависит от:

- территориальной организации (ТО) водных объектов, т.е. структуры бассейнов рек Волги, Мсты, Зап. Двины, образующих каркас территории, подготовленный в основных чертах геологической историей;
- литогеохимической основы территории, определяющей природно обусловленный фон мигрирующих элементов;

- гидротермических условий, определяющих способность элементов к миграции, воздуха – к самоочищению, а также геохимическую структуру территории, прежде всего местоположение и функции геохимических барьеров;

- организации биогеохимических циклов – состояний, противоположных по своим функциям в ЛГС гидрохимическому стоку в силу того, что в циклах элементы удерживаются в ЛГС. Эти циклы определяют соотношение выноса элементов с их объемом, удерживаемом в БИКе.

Соответствие этих общесистемных особенностей процессов друг другу, сложившееся в послеледниковое время за 10-12 тыс. лет обуславливает равновесное состояние природной основы территории. К нему адаптированы сельскохозяйственный и другие виды деятельности, система расселения даже в ее текущем – перестраивающемся – состоянии.

Равновесность в природе проявляется в том, что

- территория области в целом выступает как район формирования гидрохимического стока по отношению к соседним территориям; ее почвообразующие породы бедны микроэлементами. Данное динамическое состояние неизменно воспроизводится сложившейся взаимосвязью природных компонент;

- в пределах самой области существует функциональное разграничение территорий в системе геохимического сопряжения: выделяются районы преимущественного выноса подвижных элементов и относительной концентрации малоподвижных; районы их преимущественной аккумуляции; промежуточные территории транзитного гидрохимического стока. Особое положение в этой системе занимает Тверской микрорайон, аккумулирующий на своей территории сток из пределов Осташковско-Селижаровского, Старицко-Ржевского, Тверецкого, в определенной степени Цнинско-Мстинского микрорайонов, а также из Московской области.

Важная черта сложившегося природного равновесия - отсутствие природно обусловленных вредных геохимических аномалий. Нарушения сложившегося равновесия в силу антропогенных причин приводят к возникновению геохимических аномалий. Непосредственными причинами такого развития процессов могут быть нарушения в ТО водных потоков (зарегулирование стока или, наоборот, гидродинамические аварии); в литогеохимической основе (систематическое внесение удобрений или их складирование в поле; устойчивое загрязнение территории выбросами предприятий и т.д.); гидротермических условий (создание новых водохранилищ; направленная изменчивость климата и т.д.); в организации биогеохимических циклов (сведение лесов; существенные изменения в структуре биогеоценозов за счет замещения лесов болотами или пашней и т.д.).

В итоге, нарушение природного равновесия (переход территории в иное состояние, к которому в т.ч. не адаптирован человек) может стать результирующим событием, связанным с состоянием названных факторов. Такой переход возможен при достаточно сильном воздействии на некоторые ключевые точки территории, например, за счет разового высвобождения одного из или всех мощных энергетических потенциалов, сосредоточенных в Цнинско-Мстинском микрорайоне (КАЭС и др.).

С другой стороны, названная зависимость Тверского микрорайона от других в системе геохимического сопряжения означает, что возникновение вредной геохимической аномалии может быть подготовлено воздействием на водный сток в одном из названных микрорайонов - с учетом способности водных потоков к са-

моочищению, колеблющейся по сезонам года, а также в зависимости от уровня загрязненности вод и т.д.

2. ТО водных потоков определяется структурой бассейнов рек Волги, Мсты, Зап. Двины. Они имеют общую вершину - склоны Валдайской возвышенности. В силу этого возвышенность оказывается объединяющим природную систему области центром, а также ее управляющим (на основе принципов самоорганизации) центром: водный сток с нее обеспечивает единство геохимических процессов на основе сопряжения автономных элювиальных ландшафтов водораздельных поверхностей, элювиально-аккумулятивных ландшафтов склонов, аккумулятивных ландшафтов низин и субаквальных ландшафтов водоемов.

Бассейновая структура территории предопределена отчасти системой тектонических трещин и системой древней (доледниковой) речной сети, отчасти – эрозионно-денудационной деятельностью водноледниковых потоков. Главный элемент этой структуры - разветвленный бассейн Верхней Волги. Ее левобережные притоки практически полностью формируются в пределах территории области и концентрируют в единый поток дисперсно распределенные по возвышенности мелкие водотоки, регулируемые часто болотами и небольшими озерами. Правобережные притоки р. Волги концентрируют сток со склонов Смоленско-Московской возвышенности и Клинско-Дмитровской гряды, что делает Тверскую область зависимой от ландшафтно-геохимических процессов на севере Смоленской и Московской областей, отчасти - в Ярославской области. В свою очередь, через бассейны рек Мсты, Зап. Двины, притоков р. Ловати Тверская область влияет на Новгородскую и Псковскую области.

Особенностью бассейновой структуры территории является измененность природно обусловленной схемы межбассейнового распределения стока: исходно сток р. Цны осуществлялся по р. Мсте в оз. Ильмень. Ныне Вышневолоцкое водохранилище перераспределяет его между Твердой и Мстой.

Важная особенность структуры речных бассейнов - их тесная связь с озерами на водораздельных поверхностях, что обеспечивает естественное регулирование стока, и наличие большого количества водохранилищ, обеспечивающих искусственное регулирование стока. Без последних ныне - какой бы критике не подвергался факт их существования - немислимо природное равновесие на территории, к которому адаптирована ТО жизни человека. Однако это не означает возможности строительства новых водоемов: существующие проекты в случае их реализации могут подорвать основу сложившегося равновесия. Другая сторона вопроса о водохранилищах - то, что их гидроузлы - «кнопки» на пульте управления природным равновесием в системе ТО области: гидродинамические аварии - случайные или преднамеренные - помимо непосредственного эффекта волны добегания принесут и более сложные отдаленные последствия.

Сложившаяся бассейновая структура территории определяет ее геохимическую структуру: соотношение зон выщелачивания, транслокации и аккумуляции химических элементов, расположение и типы геохимических барьеров. С этой особенностью ТО водных потоков оказывается тесно связанным вопрос о формировании геохимических аномалий, прежде всего техногенных, вопрос о способности вод к самоочищению и свойстве буферности почв.

В связи с ТО водных потоков существует проблема гидрологически опасных явлений - наводнений и паводков, а также распространения депрессионной ворон-



ки грунтовых вод из пределов Московской области в Тверскую, что приведет к обмелению Иваньковского водохранилища. Проблема наводнений и паводков смягчена или снята в сильно облесенных районах и на участках русла р. Волги, регулируемых водохранилищами. Однако, она уже актуальна для оз. Селигер и особенно актуальна на притоках р. Волги в менее всего облесенном Ржевско-Старицком микрорайоне, на ее притоках, лишенных естественного регулирования в Кимрско-Калязинском микрорайоне. То же самое касается бассейна р. Зап. Двина.

В целом, гидрологически опасные явления производны от состояния водного стока (его распределения по сезонам года), инфильтрационных свойств почв, годового хода метеоэлементов и т.д. Эти вопросы подлежат целенаправленному изучению.

3. Главная особенность литогеохимической основы территории названа выше: отсутствие в ее составе высоких концентраций очень токсичных и токсичных веществ. Она может быть использована в вопросах обеспечения экологической безопасности территории в качестве эталона для выявления чужеродных примесей и их источников с учетом закономерностей геохимического сопряжения. Другая важная особенность - чужеродность ее химического состава для территории Центра и ее единство в этом вопросе с Северо-Западным регионом в силу того, что почвообразующие породы на этой обширной территории сложились в ходе оледенения.

4. Гидротермические условия характеризуют климатические условия территории и определяются через соотношение прихода осадков и энергообеспеченности процессов на территории, определяющих уровень испаряемости на территории. В геохимических процессах гидротермические условия определяют подвижность элементов и способность территории к самоочищению.

ЧС, связанные с динамикой состояний атмосферы, на территории области специфичны: они характеризуются достаточно высокой потенциальной повторяемостью, однако, степень их выраженности может быть оценена как «умеренно опасные», в крайнем случае - «опасные».

Повышенная повторяемость обусловлена положением Центра Русской равнины в целом на пути движения всех воздушных масс, вторгающихся в Европейскую Россию. В силу этого возможны и наблюдаются все виды ЧС, связанных с беспокойным состоянием атмосферы - от сильных ветров до смерчей. Однако область находится в зоне с самым низким на Русской равнине значением предельных скоростей ветра, превышаемых 1 раз в 65 лет.

На территорию области приходится повышенное годовое количество осадков. Это - общий фактор большого класса ЧС в разных сферах, связанных с состояниями атмосферы, гидрологически опасными явлениями, механическим перемещением грунтов и т.д. Разовыми оказываются такие опасные явления как сильные снегопады, интенсивные дожди и ливни, гололеды и т.д. Они наносят значительный ущерб всем сферам хозяйственной деятельности, прежде всего сельскому хозяйству. Пониженная энергообеспеченность территории означает пониженную испаряемость и это приводит к застойным явлениям во влагообороте - к широкому распространению озер и болот. Интенсивные продолжительные дожди могут вызывать вымокание посевов и т.д.

Статистические данные показывают, что атмосферные процессы на территории подвержены определенной ритмике: наблюдается чередование лет повышенной гумидности и повышенной аридности. По длительности такие периоды совпадают с полуциклами 20-22-летней солнечной активности. Сопоставление фактических данных показывает, что сельское хозяйство области более устойчиво к засушливым отклонениям климатических характеристик. Но в такие годы резко возрастает состояние пожароопасности в связи с большим распространением лесов и болот.

Пониженная интенсивность влагооборота (большое количество осадков и пониженная энергообеспеченность процессов) обуславливает заторможенность водообмена в понижениях рельефа на возвышенности, на некоторых низинных территориях. Следствие этого - повышенная заболоченность; пониженная способность вод к самоочищению, возможность накопления в них токсичных веществ. Последнему особенно подвержены элювиально-аккумулятивные ландшафты склонов, аккумулятивные ландшафты низин, болота, донные ландшафты водоемов.

5. Исключительную роль в ТО водного баланса территории и геохимических процессов играет растительность, осуществляющая биологический круговорот (БИК) в природных системах. Функционально роль БИКа противоположна роли гидрохимического стока: растения задерживают влагу - соответственно, транспотируемое ею вещества - в природных системах. Тем самым регулируется водный и химический балансы территории в принципе, а также равномерность стока по сезонам года. Уникальность водораздельных территорий, заключающаяся в способности до сих пор регулировать и воспроизводить сток по речным бассейнам, обеспечивается их высокой облесенностью, мало нарушенной в процессе освоения территории. Исключительную роль при этом выполняют еловые фитоценозы. Уничтожение лесов (сведение за счет лесодобычи, подтопление в результате строительства крупных водохранилищ, гибель в результате применения ядохимикатов) могут привести к экологической катастрофе.

Ввиду различий в облесенности территории неодинаково состояние геохимического обмена на них: разные типы растительных сообществ способны накапливать разные ассоциации химических элементов. Вследствие этого различные микрорайоны различаются по своей способности накапливать различные токсичные элементы (с учетом различий в энергообеспеченности территорий и различий в типах почв). Для настоящего времени констатируются (в том числе): сильная обедненность микроэлементами водоразделов; способность наиболее распространенных в области дерново-подзолистых почв аккумулировать такие токсичные элементы как Pb, Cd, Hg; временно задерживать Z, V, As, Se и др.; тенденция роста щелочной реакции атмосферных осадков в развитых промышленных центрах (Тверь, Конаково, Кимры), что влечет рост риска загрязнения почв в условиях достаточной обезлесенности южных и юго-восточных районов и повышенной (для условий области) энергообеспеченности территории; следствием предыдущего может быть повышение содержания железа и других элементов в почвах Кашинского, Кесовогорского, Краснохолмского, Сонковского, Конаковского, Торжокского административных районов.

Работа выполнена при поддержке МЧС России.

РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ КАК ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ОЗЕРНЫХ  
ЭКОСИСТЕМ (БАСЕЙН р. ИЛЕКСЫ, НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПАРК «ВОДЛО-  
ЗЕРСКИЙ»)

Литвиненко А.В., Богданова М.С.

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

Озера в значительной степени похожи на живые организмы. Им отпущен разный срок жизни, в течение которой они проходят те же этапы, что и люди — рождение, детство, юность, зрелость, старость и смерть. Конечная стадия любого озера — превращение в болото. На скорость протекания этого процесса влияют разные факторы, как природные, так и антропогенные. Этот жизненный цикл обусловлен постоянно происходящим взаимодействием между озерной котловиной с одной стороны и водной массой, водосбором озера и заселяющими озеро организмами с другой.

В ходе происходящих естественных процессов в ландшафтах водосборов, а также возможных различных видов антропогенного воздействия (мелиорация болот, распашка сельскохозяйственных угодий, внесение удобрений, рубки леса и т.п.), в водоемы поступают продукты эрозии и питательные вещества, способствующие их обмелению и зарастанию.

Морфологические характеристики озер (площадь, глубина и т.д.) являются одним из определяющих факторов, влияющих на скорость протекания природных процессов, происходящих в них. Именно это объясняет тот факт, что водоемы, образовавшиеся в один период времени могут быть разного «возраста». В озерах с небольшой площадью и малыми глубинами, процессы «старения», зарастания идут намного быстрее, чем в больших и глубоких. В «стареющем» водоеме происходит:

- уменьшение площади акватории за счет заболачивания мелководий и образования прибрежных сплавин;
- увеличение площади зарастания макрофитами (водными растениями: погруженными, полупогруженными и надводными);
- увеличение площади фитоценозов с доминированием высокотравных гелофитов (болотных травянистых растений) за счет сообществ, произрастающих на прибрежных сплавинах, и сокращение площади сообществ гидрофитов (водных растений, прикрепленных к почве и погруженных в воду только нижними своими частями);
- обеднение видового состава макрофитов, особенно погруженных гидрофитов и прикрепленных гидрофитов с плавающими листьями;
- уменьшение видового разнообразия растительных сообществ (Экология зарастающего озера..., 1999).

Эти процессы в условиях Карелии наиболее характерны для водоемов национального парка «Водлозерский», особенно для озерно-речной системы Илексы с интенсивно идущими в ней русловыми процессами (рис. 1-3).



Рис. 1. Зарастание тростником на оз. Монастырском



Рис. 2. Зарастание на оз. Калгачинском



Рис. 3. Береговые комплексы р. Верхней

Река Илекса является верхним звеном озерно-речной системы р. Невы (р. Илекса – оз. Водлозеро – р. Водла – оз. Онежское – р. Свирь – оз. Ладожское – р. Нева – Финский залив Балтийского моря) (рис. 4). Площадь водосбора р. Илексы составляет 3950 км<sup>2</sup>. Бассейн реки вытянут в меридианальном направлении. Его длина равна 120 км, максимальная ширина 53, средняя ширина – 33 км. Гидрографическая сеть бассейна включает 212 водотоков и 407 водоемов (Вислянская и др., 1995а, 1995б).

Водосбор р. Илексы расположен на самой окраине Фенноскандинавского (Балтийского) щита, в области распространения кристаллических пород архейско-протерозойского возраста, перекрытых чехлом рыхлых ледниковых отложений, мощностью 110-130 м. На севере бассейна, в районе кряжа Ветреного пояса, распространены ландшафты сельговых гряд, в центральной и южной частях встречается сочетание озерно-ледниковых равнин, олиготрофных, мезотрофных и евтрофных торфяников, а также водно-ледниковых и моренных возвышенностей. Площадь болот и заболоченных лесов в некоторых частных водосборах достигает 50-70%. В структуре растительного покрова преобладают еловые и сосновые леса.

Русловые процессы на р. Илексы развиты в зоне относительно мощных четвертичных отложений, имеющих слабую сопротивляемость размыву, при достаточно мощной энергии речного потока. В русле р. Илексы при визуальном осмотре отчетливо видны следы береговой эрозии: в ряде мест берега подмыты, нередки осыпи. Это очень важное обстоятельство, так как для водных объектов Карельского гидрографического района существенная переработка русел с выносом больших объемов речных наносов не характерна. Врез русла реки больше, чем озерных котловин. Данное обстоятельство является причиной быстрого, происходящего практически на глазах одного поколения, естественного старения водоемов, расположенных непосредственно на главной оси озерно-речной системы Илексы (озера Калгачинское, Тун, Монастырское, Лузское) (см. фото).

Наиболее наглядно это видно по морфометрическим характеристикам озер, особенно по глубине (табл.). Как видно из таблицы, средняя глубина озер бассейна р. Илексы составляет всего от 0,5 до 2,4 м.

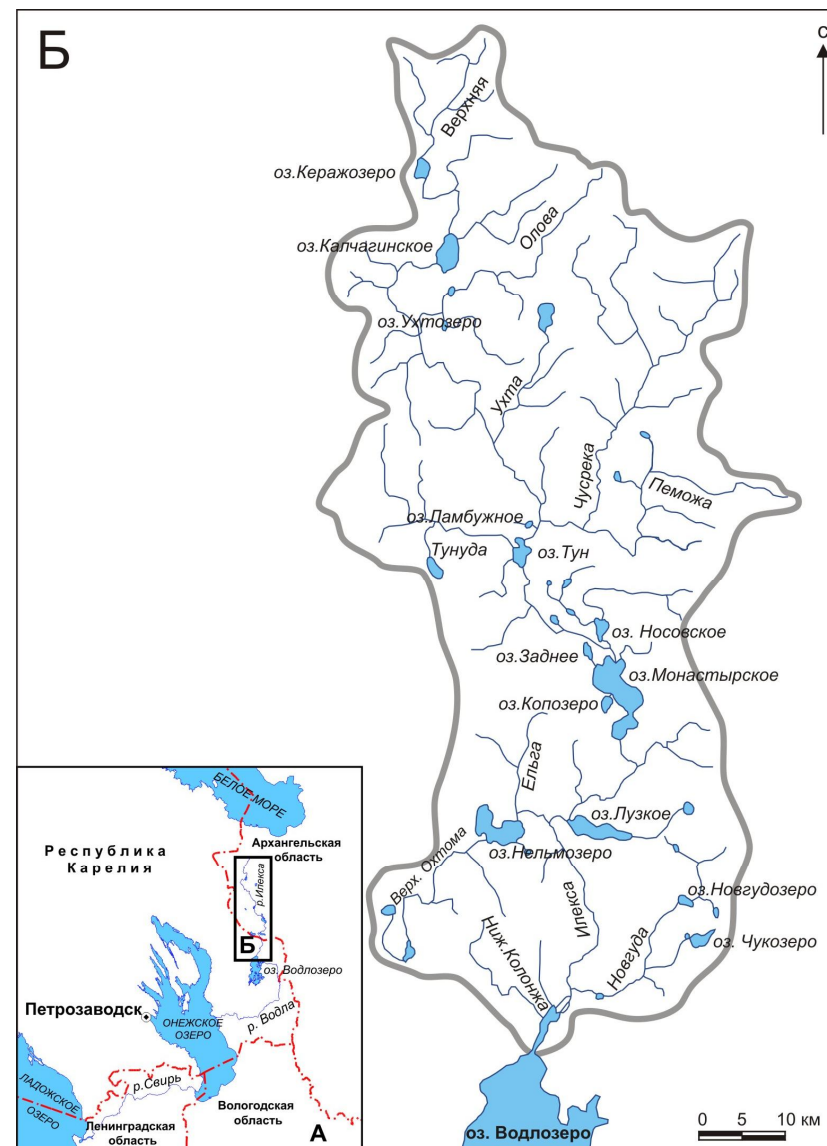


Рис. 4. Схема бассейна р. Илексы





## ЗАДАЧА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ПРИРОДООХРАННЫЕ ОБЯЗАТЕЛЬСТВА РОССИИ

И.М. Мазурин, В.В. Понуровская

*ЭНИН им. Г.М.Кржижановского*

Цель данной работы – анализ сложившейся ситуации по ресурсо- и энерго сбережению в России в условиях природоохранных обязательств России, а также прогноз развития этого направления в будущем.

Маркетинговые исследования, проведенные компанией SBCD Exro в 2008 г., показали, что, несмотря на кризисные явления в мировой экономике, такие основополагающие базовые принципы как экологическая безопасность и экономия ресурсов, лежащие в основе альтернативной энергетики, станут приоритетными и сохраняют свою востребованность и актуальность в большинстве стран на долгие годы [1].

По прогнозу Председателя Правительства РФ В.В. Путина, “Россия должна стать инициатором и “законодателем мод” в энергетических инновациях, в новых технологиях преобразования энергии, в поиске современных форм ресурсо- и энергопотребления. Россия может и должна стать альтернативным мировым энергетическим центром” [1]. 20 января 2009 г. им было подписано распоряжение, утверждающее основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 г. С 23 ноября 2009 года вступил в силу Федеральный закон №261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Новый закон заменил прекративший действие Федеральный закон №28 «Об энергосбережении», который хотя и действовал с 1996 года, но носил декларативный характер, не имел реальных механизмов стимулирования и использовался лишь теми, кто по собственной инициативе стремился к рациональному использованию энергетических ресурсов.

Основной идеей, заложенной в новый закон об энергосбережении, является задача снижения энергоёмкости ВВП Российской Федерации на 40% к 2020 году по отношению к 2007 году при любом сценарии экономического развития нашей страны [2]. Такая задача обусловлена тем, что в ряде отраслей нашей экономики энергопотребление превышает зарубежные аналоги в несколько раз. Однако на этот счет имеется и другое мнение. Достаточно показательным будет сравнение энергопотребления в системах жилищно-коммунального хозяйства на отопление, которое имеет прямую зависимость от климатических условий. Среднегодовая температура в Испании составляет плюс 18°C, а на территории Российской Федерации минус 4,5°C. Очевидно, что в таких условиях затраты на отопление и теплоизоляцию будут отличаться очень существенно. Тепловые потери жилища в основном связаны с четырьмя составляющими:

- вынос тепла с воздухом через вентиляцию;
- потери тепла за счёт теплообмена через стены;
- тепловые потери через окна и примыкания к стенам оконных рам;

- унос тепла с водяными стоками.

Наиболее существенной составляющей теплопотерь является унос тепла системой вентиляции. Для трёх зимних месяцев в средней полосе России перепад температур в жилище и на улице составляет не менее 30 °С. При расходе 40 м<sup>3</sup> в час на одного человека унос тепла по системе вентиляции составляет от 20-40% от тепла, подаваемого на отопление помещения. На практике в условиях российской зимы либо уменьшают воздухообмен, либо ставят рекуператоры в системе вентиляции.

Две другие составляющие теплопотерь имеют сугубо конструктивную основу и связаны с качеством изготовления. Теплоизоляция стен, пола и потолков, а также конструкция рам и качество исполнения швов и уплотнений могут сэкономить до 20 % потребляемой энергии. В связи с этим в 2003 году был принят новый СНиП 23-02-2003 "Тепловая защита зданий", заменивший СНиП Н-3-79\* "Строительная теплотехника". В соответствии с новыми строительными нормами требуемое сопротивление теплопередаче увеличилось в 3-3,5 раза по сравнению со старыми нормами [3].

В более теплых странах (южнее 57° с. ш.) уже есть примеры решения жилищ с нулевым энергопотреблением для отопления. Эта экономия осуществляется прежде всего за счет рекуперации тепла от:

1. вентиляции;
2. водяных канализационных стоков;
3. тепловых потоков от работающей бытовой техники.

Обычный бытовой холодильник является маломощным тепловым насосом с отопительным коэффициентом от 2 до 3. При этом конденсатор холодильника в жилище является отопительным прибором небольшой мощности.

Семейный человек расходует в жилище 300-400 л воды в сутки. Эта вода теплее окружающей среды примерно на 20°C, значит, она способна отдавать около 300 Вт тепловой энергии в час (7,2 кВт час в сутки). Через вентиляцию каждый час в окружающую среду уходит 50-250 кг воздуха. Поставив рекуператор в систему вентиляции, мы сможем сэкономить около 1,76 кВт в час. Безусловно, такая система эффективна только при условии, что среднемесячная температура не опускается ниже -5°C, но даже при этом условии можно обеспечить половину отопительного сезона в России сэкономленной тепловой энергией, т.к. средние температуры октября, ноября и марта редко опускаются ниже -5°C.

Еще одним шагом на встречу высоким показателям энергоэффективности и энергосбережения стал форум ENERGY FRESH 2010, призванный продемонстрировать инновационный потенциал и перспективы развития возобновляемых источников энергии, способствовать углублению международного сотрудничества. Отечественные разработки в основном были представлены солнечными батареями и тепловыми коллекторами. Правда, далеко не всегда представленные образцы были серийными. В противоположность этому вся иностранная продукция была с конвейера, ее можно было заказать и купить в личном пользовании прямо на месте. Среди представленных образцов большой интерес вызвали солнечные батареи (КПД 14-15%), портативные ветрогенераторы (400-500 Вт при стартовой силе ветра 2,5 м/с) и системы накопления энергии [4].

В свете всего вышесказанного необходимо разобраться, насколько и в каких условиях эффективны предложенные разработки. У солнечных батарей крайне

низкий КПД, они дороги, установок по их утилизации в нашей стране не существует. К тому же, они малоэффективны в зимний период севернее 45° с.ш.. Что касается ветрогенераторов, то они эффективны при наличии высоких скоростей ветра, т.е. в нашей стране в зоне тундры, степи и на побережье морей и океанов. Они также достаточно дороги, и после их эксплуатации также возникают проблемы по утилизации аккумуляторов, без которых ветроустановки не эксплуатируются. Кроме того при их работе могут возникать шумы вредного спектра воздействия на все живое. Иными словами то, что хорошо в тёплых странах для климатических условий России непригодно.

В последнее время на российском рынке в качестве альтернативных и возобновляемых источников энергии все чаще стали появляться древесные и древесно-угольные брикеты пламенного и беспламенного горения, что совершенно не удивительно. Гипотетические запасы древесного угля, торфа и сланцев в нашей стране самые большие в мире.

На одного человека в России приходится 5 га леса. Только по санитарным рубкам каждому может достаться 10 м<sup>3</sup> древесины в год. В уголь при пиролизе переходит 12% древесины, т.е. не менее 1 т угля в год – это потенциал в расчете на одного человека, т.е. в РФ запасы древесного сырья только по санитарным рубкам достаточны для получения примерно 8500 кВт часов тепловой энергии на человека, т.е. около 40 кВт час в сутки на 220 дней отопительного периода.

Рубки товарной древесины составляют не менее 300 млн. м<sup>3</sup>, из которых в деловую древесину переходит около половины. Остальное - отходы. Реально, с учётом 30% исполнения санитарных рубок, общий сырьевой баланс по отходам древесины в условиях сегодняшнего дня оценивается на уровне 250 млн. м<sup>3</sup> ежегодно. При переводе в уголь это даст 30 млн. тонн эффективного топлива. По энергии это 24 10<sup>10</sup> кВт ч. Этого тепла вполне достаточно для годового теплоснабжения 24 млн. человек на широте Екатеринбурга.

Однако, существует целый пласт направлений, связанных с альтернативными источниками энергии и энергоносителями, в отношении которого вот уже 20 лет не предпринимается никаких действий. Прежде всего, речь идет о производстве электроэнергии с использованием уже отработанного на турбине горячего пара. Сейчас это «бросовое» тепло в отопительный сезон идёт на отопление жилища. При этом 60-70 % тепла теряется в процессе транспортировки горячей воды по трубам. Отопительный сезон на широте Москвы длится 220 суток. Что же происходит с горячим паром, отходящим от турбины в остальные 140 суток? Его направляют в градирню, где охлаждают до состояния теплой воды. Все тепло, отданное горячим паром в градирне, просто выбрасывается в атмосферу. Охлажденная вода затем снова включается в турбинный цикл. К.п.д. турбинного цикла на воде составляет всего 38-39 %. Его можно повысить, если использовать энергию отработанного на турбине пара во втором контуре, где рабочим телом могут служить фреоны, т.к. их критические параметры существенно ниже, чем у воды, и они могут дать перегретый пар для турбинного цикла при температурах на 250-300°С ниже, чем для воды. В Японии, например, уже лет 25 назад по этой схеме использовали тепло горячей воды предприятий черной металлургии и отходящий газ цементных обжиговых печей, а также регенерировали примерно 10 % энергии дизельных двигателей.

Неиспользованным энергетическим потенциалом является также попутный

газ нефтепромыслов. Его ежегодно сжигают (по разным оценкам) в количестве от 20 до 50 Мт, что вполне сравнимо с объёмом поставок газа в Европу. При этом сгорают лёгкие фракции, а тяжёлые фракции углеводородов сгорают в факеле не успевают и в течение последних пятидесяти лет загрязняют окружающую среду. Использовать тепло сжигания попутного газа вполне возможно, поскольку расход газа на одном месторождении достаточен для обеспечения генерации электроэнергии на уровне 1-3 Мвт. Но при этом необходимо решить технические задачи по конструкции котла малой мощности и подбору рабочего тела для соответствующей турбины.

• Кроме всего вышеперечисленного, по такой же схеме можно использовать геотермальную энергию, потенциал которой в России 180 трлн. т у. т. В основном это регионы Камчатки, Курильских островов и Северного Кавказа. Тем не менее, сегодня в России функционируют только две геотЭС: Паратунская и Паужетская на Камчатке, причем построены они были еще в 60-х годах прошлого века. За последующие 40 лет практически ничего не было сделано для развития этой отрасли энергетики. В общей оценке задачи энергосбережения потенциал экономии энергии в России огромен. Значительных величин экономии энергии и ресурсов энергоносителей можно достичь в двух основных направлениях.

1. Необходимо уменьшить теплопотери в бытовом секторе за счёт:

- улучшения теплоизоляции жилых домов
- рекуперации тепла вентиляции жилых домов
- рекуперации тепла жидких бытовых стоков
- уменьшения энергопотребления бытовой техники (в том числе холодильников и осветительных приборов)

2. Необходимо уменьшить теплопотери в промышленности и эффективно использовать «забытые» энергоносители при генерации электроэнергии, обеспечив при этом:

- увеличение КПД тепловых и атомных ЭС;
- развитие Геотермальных ЭС;
- создание автономных ТЭС малой и средней мощности на «забытых» энергоносителях (древесных отходах, торфе, сланцах и попутном газе);
- рекуперацию тепла промышленных печей и прочих крупных источников отбросного тепла;
- переход на эффективные рабочие тела при генерации промышленного холода;
- использование тепловых насосов для отопления промышленных и бытовых зданий;
- улучшение теплоизоляции промышленных зданий;
- использование рекуперации тепла вентиляции и жидких стоков промышленных зданий.

Значительная часть перечисленных задач по энергосбережению в промышленности исследовалась и имела пути решения в 70-80 годах прошлого века, особенно в отношении генерации электроэнергии в турбинном цикле. Перечень этих задач и путей их решения представлен ниже.

- Увеличение КПД ТЭС- изменение цикла или замена воды на другое рабочее тело.

- Увеличение КПД АЭС – изменение схемных решений или замена воды на другое рабочее тело.
- Проектирование и строительство Геотермальных ЭС- отыскание безопасных для человека рабочих тел под параметры конкретного источника.
- Использование торфа, древесных отходов, сланцев и попутного газа – необходим подбор рабочих тел для использования существующих технологий по безопасному сжиганию «забытых» энергоносителей
- Использование отбросного тепла цементных печей - отыскание рабочих тел, стабильных при температурах выше 400оС

**Сегодня общей чертой перечисленных задач является отсутствие незапрещённых и безопасных рабочих тел для энергетических циклов.**

Причины сложившейся ситуации нужно искать в 1987 году. Это год принятия Монреальского протокола, запретившего все хлорсодержащие рабочие тела. И, хотя и в самом протоколе, и в эксперименте, на котором он базировался, есть много спорного, протокол продолжает и по сей день действовать на территории России.

Какие рабочие тела не попали под его запреты? Это фторуглероды, углеводороды, аммиак, углекислый газ и элегаз. Какие из этих веществ стоит предпочесть в качестве рабочего тела?

Углеводороды крайне взрывоопасны, поэтому их использование безопасно только в микроагрегатах (50 г рабочего тела на 10 м<sup>3</sup> объема). Аммиак ядовит и взрывоопасен. Углекислый газ имеет при нормальных условиях хранения очень высокое давление (примерно 55 атм при 20С). Элегаз и фторуглероды обладают по сравнению с другими рабочими телами целым рядом преимуществ:

1. имеют при хранении низкое давление;
2. эффективны как пожаротушащие вещества и при этом безопасны по кардиотоксичности (их пожаротушащая концентрация в 3 раза ниже кардиотоксичности);
3. не растворяются в крови человека;
4. обладают высокой термостойкостью (350°С – температура начала разрушения у элегаза в присутствии катализаторов, и выше 600°С – температура разрушения фторуглеродов в присутствии катализаторов).

Однако все эти рабочие тела попали в категорию «парниковых газов» по Киотскому протоколу. После чего СМИ, по аналогии с Монреальским протоколом, решили, что это запрет. Парадокс заключается в том, что официально Киотский протокол вообще не содержит никаких запретов. Этот документ рекомендательного и декларативного характера, созданный для обеспечения торговли квотами на эмиссию «парниковых газов». Сомнения в его научной обоснованности стали причиной провала в 2009 году климатического саммита в Копенгагене. А в 2005 году в интервью Washington Times Тони Блэр отметил, «что ни одна страна в мире не пожертвует своим экономическим ростом или снижением потребления энергии в экологических целях ...». По его мнению «...после окончания в 2012 году действия Киотского протокола, он не будет возобновлён ни в каком виде». Возможно, его слова станут пророческими. Из Киотского протокола в декабре 2009 г. вышли США, Австралия, Бразилия, Китай, Индия и ЮАР. Что касается России, то она не только не вышла из протокола, но и единственная из всех стран не смогла создать на своей территории национальную систему регулирования выбросов и поглощения парниковых газов. Единственным исключением стало пожарное

ведомство России, которое, несмотря на все мнимые запреты Киотского протокола, официально издало несколько документов, касающихся использования фторуглеродов и элегаза для пожаротушения.

Но если у энергосбережения в России еще есть перспективы, то вот центром ресурсосбережения (как мечтает Председатель Правительства В.Путин) Россия вряд ли станет. Дело в том, что принятый в 1987 году международный стандарт качества ISO-9001, вводящий обязательные рецикл и утилизацию использованной продукции, претерпел в 1994 году некоторые изменения. В этом новом, «смягченном» варианте ISO-9001 исчезло не только понятие петли качества, по которой рецикл и утилизация были обязательны, но нет и понятия «рециклирование».

Зато в этом стандарте (п.3.1)[5] в определении термина «продукция» почему-то делается акцент, что только побочная продукция влияет на окружающую среду. Конечно, если основная продукция на окружающую среду не влияет, то утилизация и рецикл становятся просто излишними. Для условий развивающихся стран и России такое принятие событий означает ухудшение экологической обстановки, поскольку одни только корпуса бытовых холодильников составляют от 10 до 15 % бытового мусора, вывозимого на городские свалки.

Но наибольший урон при изменении стандартов ISO-9001 претерпела идея ресурсосбережения. После 1994 года про неё европейские СМИ уже не вспоминали. Термин середины 80-х годов «энерго-ресурсосбережение» к середине 90-х годов остался «энергосбережением».

Для России даже такая версия стандарта оказалась неприемлемой. В 2008 году Россия принимает национальный стандарт ГОСТ Р ИСО 9001-2008. Само принятие этого документа кажется странным, т.к. по закону «О техническом регулировании» [6] все ГОСТы в январе 2010 года становятся недействительными и должны уступить свое место техническим регламентам. И вдруг принимается новый стандарт, который отличается в худшую сторону даже от версии 1996 года. Рассмотрим подробнее эти отличия.

Согласно п. 4.4.5 [5] в версии 1996 года выходные проектные данные должны идентифицировать те характеристики проекта, которые являются решающими для безопасного и надлежащего функционирования продукции (например, требования, относящиеся к эксплуатации, хранению, погрузочно-разгрузочным работам; техническому обслуживанию и утилизации.) В версии документа 2008 года эти характеристики проекта не перечислены, а, следовательно, юридически не закреплены.

В ISO-9001 2008 [7] года вообще нет некоторых важных, с точки зрения экологии и безопасности, пунктов, а именно:

- 1) проверка потребителем продукции, поставляемой субподрядчиком изготовителя;
- 2) входной контроль и испытания продукции;
- 3) анализ и утилизация продукции, не соответствующей установленным требованиям на месте приобретения.

Конечно, в России и помимо стандартов ISO существует грамотная схема управления отходами – федеральный закон №89 «Об отходах производства и потребления», принятый в 1998 году. Однако изменения, произошедшие с ISO-9001, обрекают этот закон на нулевую эффективность.

Итак, становится очевидным, что если мы не вернемся к первичному тексту

ISO-9001 и не отвергнем мнимые запреты Киотского протокола, мы еще очень не скоро встанем на курс энерго и ресурсосбережения, заданный правительством.

Выводы:

Для решения задач по энергосбережению, поставленных на законодательном уровне:

1. Необходим возврат к первичному тексту ISO-9001 редакции 1987 года.
2. Вполне возможно и очень перспективно использование «парниковых газов» в качестве рабочих тел энергетических циклов

### Литература

1. С. Черевко. «Энергетическая стратегия в условиях глобализации», <http://aenergy.ru/1173>
2. №261-ФЗ от 11.11.2009 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» в ред. Федерального закона от 27.07.2010 №237-ФЗ
3. СНиП 23-02-2003 "Тепловая защита зданий", дата введения 2003-10-01
4. Р. Калинин «Заработать – не главное», Финансовые известия, 30.09.2010
5. ГОСТ Р ИСО 9001-1996 Системы качества. Модель обеспечения качества при проектировании, разработке, производстве, монтаже и обслуживании.
6. №184-ФЗ от 27.12.2002 «О техническом регулировании» в ред. Федерального закона от 28.09.2010
7. ГОСТ Р ИСО 9001-2008 Системы менеджмента качества. Требования.

### СПЕКТРАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАРОЖДЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЕТРОВЫХ СОЛИТОНОВ В ЖИДКОСТИ

Мочулин П.В., Шелковников Н.К.

Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Рассматривается процесс генерации и взаимодействия ветровых солитонов в жидкости. Особое внимание уделяется спектральному анализу различных стадий зарождения, формирования и развития солитона. Полученные данные могут быть полезны при прогнозировании развития ветровых солитонов в шельфовой зоне моря и их влияния на экологические процессы.

Как известно, уединенную волну открыл Дж. Ск. Расселу [1], а ее теоретическое обоснование принадлежит Буссинеску [2], Рэлею, Кортвегу и де Вризу [3]. Дальнейшее развитие в этом направлении было получено в работе американских ученых Н. Забуски и М. Крускала [4] В результате численного эксперимента, они показали, что синусоидальные колебания, распространявшиеся в нелинейной диспергирующей среде, со временем превращались в уединенные волны, взаимодействующие между собой. Этот факт нашел подтверждение в экспериментальных работах, в которых солитон создавался, как правило, волнопродукторами [5].

Что касается уединенных волн, возникающих на поверхности жидкости под действием ветра, то они являются одним из этапов развития ветровых волн, включающих в себя гравитационные и трохлоидальные волны, которые были исследованы В.В. Шулейкиным в «штормовом бассейне» [6]. При определенных условиях следующим этапом развития ветровых волн могут быть уединенные волны, что подтверждается работой [7], в которой впервые были обнаружены уединенные волны в кольцевом аэрогидроканале. Было показано, что процесс формирования солитона происходил следующим образом: под действием ветра на поверхности жидкости возникала рябь, затем – периодические волны, высота  $h$  и длина  $\lambda$  которых со временем возрастали, а соотношение глубины  $H$  жидкости  $H/\lambda$  уменьшалось, т.е. формировалось условие мелководья. Со временем, в зависимости от условий эксперимента, в канале образовывалось один или несколько (до шести) солитонов, постоянно взаимодействующих друг с другом, в результате чего оставался один из них, который существовал, пока сохранялся ветер.

Для решения большинства океанологических задач необходимо реальное представление динамических процессов, происходящих в деятельном слое океана. Важным параметром при изучении ветровых волн является их спектральные характеристики. Нами были проведена серия измерений в кольцевом аэрогидроканале, где детально рассматривались процессы зарождения и формирования солитона под действием ветра и определены основные параметры, а так же критерии, характеризующие условия, необходимые для возникновения уединенных волн [8]. В данной работе рассматривается спектральное представление этих этапов, на основе данных, полученные с помощью струнных волнографов.

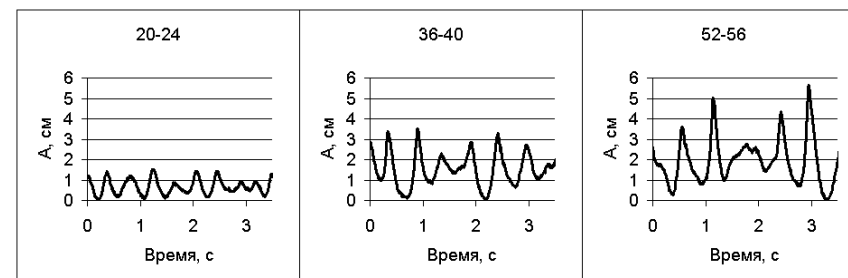


Рис. 1. Фрагменты записи развивающегося волнения в кольцевом аэрогидроканале. На графиках указан интервал времени от начала эксперимента.

Процесс образования волно-ветровых солитонов проходил следующие стадии (рис 1). После включения вентилятора образовывались гравитационно-капиллярные волны (20 с. процесса), затем появлялись гравитационные волны (фрагмент 36-40 с. записи). Их амплитуда и длина постепенно увеличивались, а профиль трансформировался. Далее, через некоторое время, образовывался цуг крупномасштабных волн (52 с.).



Спектры описанных фрагментов записи приведены на рис. 2. Форма и динамика их развития характерна для ветрового волнения, которое хорошо известно и описано во многих работах, например в [9]. Амплитуда волн под действием ветра со временем возрастала, что можно видеть как на приведенных волнограммах, так и из графиков их спектров.

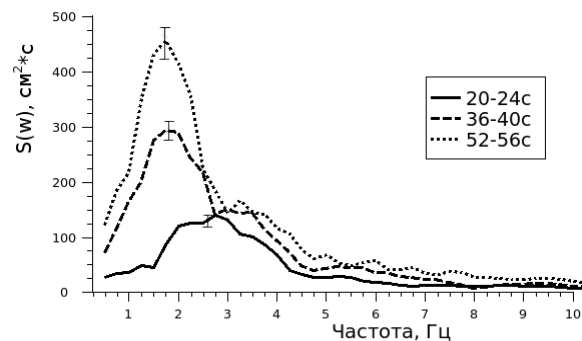


Рис. 2. Спектры волнения, соответствующие фрагментам записи рис.1. Во вставке приведены интервалы времени, отсчитываемым от начала эксперимента, соответствующие графикам.

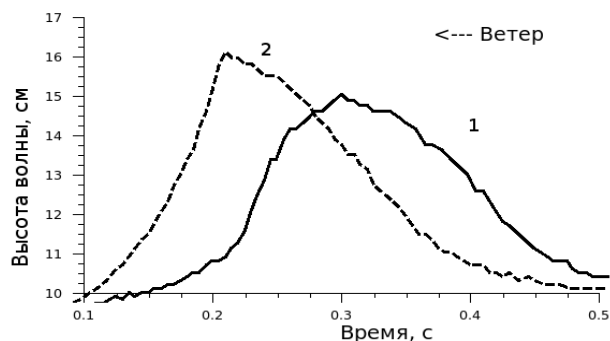


Рис. 3. Фрагменты волнограмм для разных моментов времени, иллюстрирующие формирование солитона. Приведены солитон на начальной стадии развития (1) и полностью развившийся (2) солитон. По оси X отложен временной масштаб солитонов.

Следующим этапом развития ветрового волнения в канале было зарождение и развитие ветрового солитона. На рис. 3. представлены фрагменты волнограммы, из которых видно, что со временем амплитуда солитона росла, а сам солитон укрупнялся с подветренной стороны.

На рис 4 представлены спектры двух солитонов (см. рис 3), из которых видно, что со временем имеет место сдвиг спектрального максимума в область низких частот и увеличение энергии солитона.

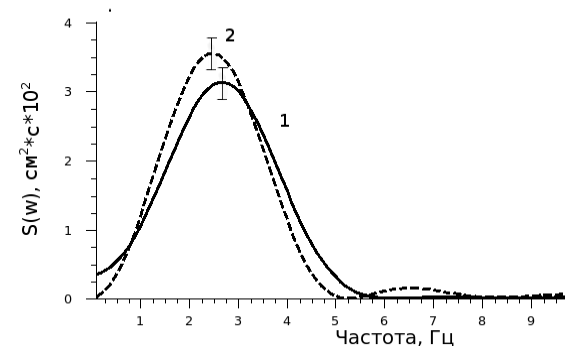


Рис. 4. Спектры солитонов (см. рис 3) в разные моменты времени.

В зависимости от условий проведения экспериментов, в кольцевом аэрогидроканале могли возникать либо один, либо несколько солитонов (до шести). В этом случае больший солитон догонял меньшие и между ними происходило последовательное попарное взаимодействие. Результатом этого являлось формирование одного солитона.

Наиболее интересной была ситуация, когда взаимодействовали два солитона, близкие по амплитуде, оставшиеся после столкновения. При этом первый солитон (впередидущий) получал дополнительный импульс и смещался вперед, а второй уменьшался и, примерно до 1,5 метров, отставал. Далее, вследствие действия ветра, высота и скорость этого (меньшего) солитона вновь возрастали, он догонял первый солитон и, на расстоянии около 50 см, взаимодействие повторялось. Таким образом, имел место частицеподобный процесс взаимодействия двух солитонов. После нескольких взаимодействий такого типа второй (меньший) солитон отставал на расстояние более чем половины длины канала и, таким образом, оказывался впереди большего солитона, который догонял его и проходил через него. После двукратного такого прохождения в канале оставался один единственный солитон.

Спектральное представление описанного процесса прохождения большего солитона через меньший приведено на рис. 5. Как можно видеть, происходит последовательное сближение двух движущихся в одном направлении солитонов, их взаимодействие и проход большего солитона через меньший (А). Спектральное представление каждого из участвующих в этом процессе солитонов приведено в правом столбце (Б). Видно, что в результате взаимодействия происходил сдвиг спектрального максимума у большего солитона в область низких частот, а у меньшего — в высокочастотную область. При этом происходило уменьшение размеров меньшего солитона в процессе взаимодействия, а форма его искажалась. При повторном таком взаимодействии меньший солитон исчезал.

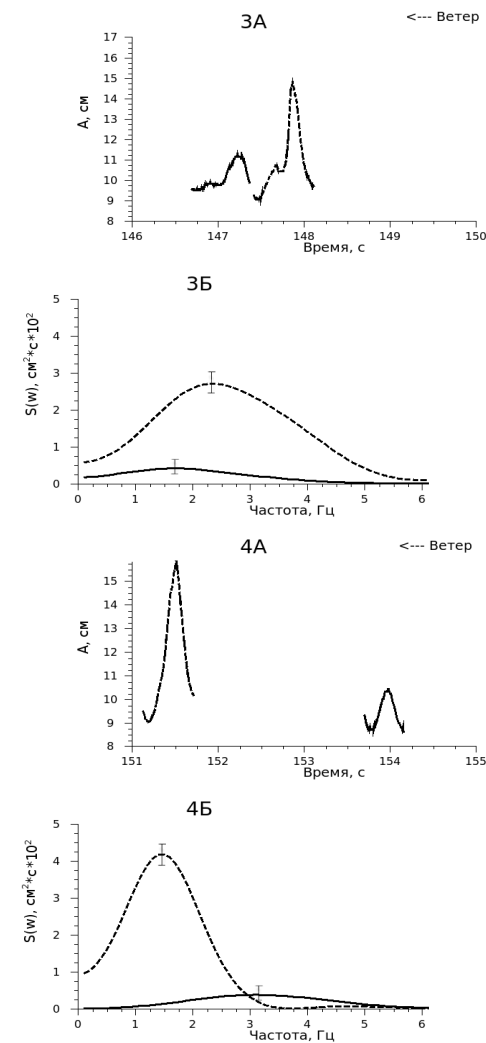
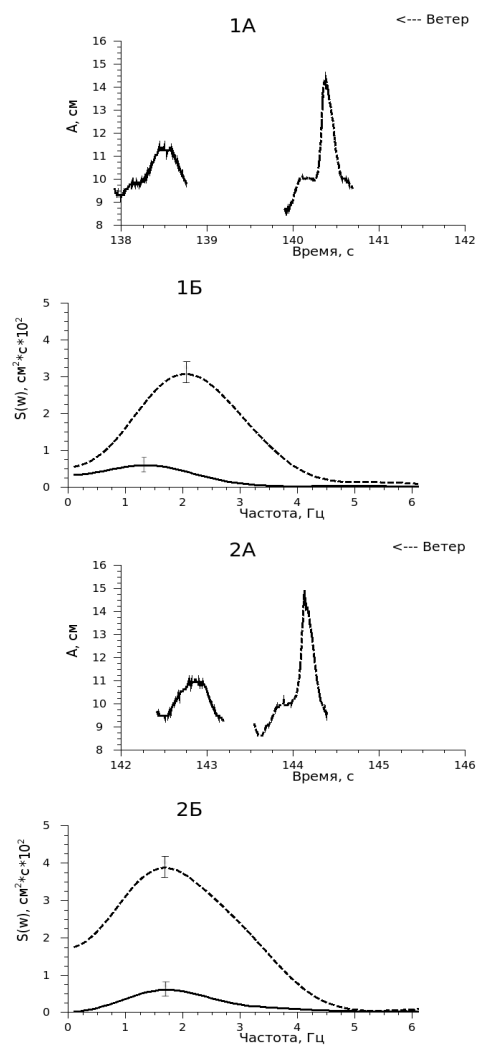


Рис. 5. Фрагмент взаимодействия двух солитонов с разными высотами (А) и их спектральное представление (Б).

Сформировавшийся солитон являлся стабильным и сохранял свою форму и амплитуду вплоть до выключения ветра. В первый момент после его выключения форма солитона изменялась, укрученность подветренной стороны исчезала, а форма его была близка к форме солитона КДВ. На рис 6 приведены фрагменты записи, соответствующие солитону до (кривая 1) и после (кривые 2,3,4) выключения ветра.

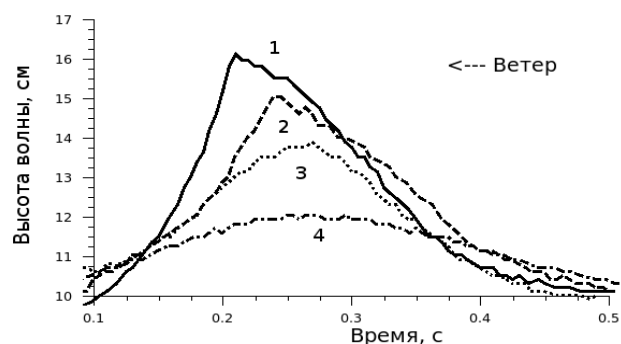


Рис. 6. Фрагменты волнограммы солитона после выключения ветра (2, 3, 4). Для сравнения здесь же приведен солитон при ветре (1).

Спектры этих фрагментов приведены на рис 7. Видно что величина спектрального максимума после выключения ветра (солитоны 2, 3, 4) постепенно уменьшалась и происходил сдвиг в область низких частот. Особенно это заметно на кривых 3 и 4.

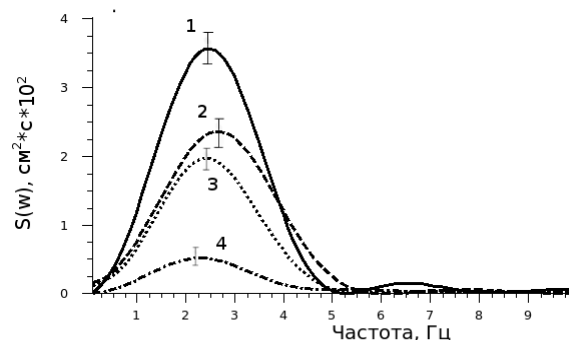


Рис. 7. Спектры затухающего солитона.

Таким образом, показано, что при формировании и развитии одного ветрового солитона имело место три вида взаимодействия солитонов друг с другом: в первом случае (на начальном этапе), когда формировалось большое число солитонов (до шести), больший солитон догонял и последовательно попарно взаимодействовал с другими впередиидущими солитонами, в результате чего он оставался один. Во втором случае, когда в аэрогидроканале оставалось два солитона, идущий вторым (меньший) солитон под действием ветра увеличивал свою скорость и амплитуду и догонял первый. В результате, если их высоты были близки, происходило частичеподобное отталкивание, второй солитон уменьшался и отставал. Этот процесс продолжался пока меньший солитон, после очередного взаимодействия, не отставал

настолько, что оказывался впереди большего, в этом случае происходил третий вариант взаимодействия. Большой солитон проходил через меньший (рис 5, столбец А), при этом спектральный максимум большего солитона сдвигался в область низких частот, а меньшего — в область высоких (рис 5, столбец Б). Происходило образование одного единственного солитона, существовавшего до конца эксперимента. При выключении ветра укученность солитона уменьшалась, увеличивалась его длина (рис 6), а максимум его спектра смещался в область низких частот (рис 7), кроме того, на начальном этапе затухания солитона он более точно описывается уравнением КДВ.

### Литература

1. Russell J.S. Report on waves, // Rep. 14<sup>th</sup> Meeting of the British Association for the Advancement of Science. John Murray. London. 1844. P.311—390.
2. Boussinesq M.J. "Theorie de l'íntumescence liquide appelee onde solitaire ou de translation, se propageant dans un canal rectanguliere", Paris, 1871, pp. 575–579"
3. Kortevog D.J., de Vries G. On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal and on a new type of long stationary waves // Philos. magazine and J. of Scienc. 1895. V. 39. Ser. 5 p. 422—443.
4. Zabusky N.J., Kruskal M.D. Interaction of "solitons" in a collisionless plasma and the recurrence of initial states // Phys. Rev. Lett. 1965. V.15, P.240—243.
5. Renouard D. P., Seabro - Santos F.J., Temperville A. M. Experimental study of the generation, damping and reflexion of a solitary wave. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*. 1985. 9. P.341 - 358.
6. Шулейкин В. В. Физика моря. Наука, Москва, 1968, 1084 с.
7. Шелковников Н.К. Вынужденный солитон в жидкости // Письма в ЖЭТФ, том 82, вып. 10, с 720-723
8. Мочулин П.В. Шелковников, Н.К. Исследования ветровых солитонов в кольцевом аэрогидроканале. // Морской гидрофизического института НАН Украины. №5 2006г. С 53-61
9. Конанкова Г.Е. Показеев К.В. Динамика морских волн // М.: МГУ, 1985
10. Пелиновский Е.Н. Гидродинамика волн цунами. // ИПФ РАН, Нижний Новгород, 1996г., 276с.
11. Мочулин П.В. Шелковников Н.К. Генерация солитонов в чистой воде и при наличии поверхностно-активных веществ // Водные ресурсы РАН 2009 том 36 №2

## ДИНАМИКА ЗЕМНЫХ ОБОЛОЧЕК И МЕХАНИЗМ РОТАЦИИ ПЛАНЕТЫ

В.В. Низовцев

*Факультет почвоведения МГУ*

*Посвящается Михайло Ломоносову*

Кризис повысил остроту восприятия экологической проблематики. Это заметно по возросшему общественному интересу к проблеме затухания Гольфстрима. В последние годы зимы в Европе стали заметно холоднее. В 2002 году в Германии на канале Майн–Дунай в лед толщиной 70 сантиметров вмёрзли два десятка судов. Климатологи утверждают, что если тенденция сохранится, то можно ожидать смещения климатических зон с образованием на севере Европы ледника. Масла в огонь подлил фантастический фильм Р.Эммериха «Послезавтра» о внезапном наступлении нового ледникового периода (2004). Похолодания связывают с замедлением Гольфстрима, вызванным таянием льдов Гренландии и СЛО, которое опресняет воды северной Атлантики и изменяет направление Лабрадорского течения. Однако, опираясь на альтиметрические данные со спутников, специалисты НАСА утверждают, что течения Гольфстрима наоборот стали мощнее. Учитывая, что подобные высказывания могут иметь геополитическую подоплёку (от прогнозов по Гольфстриму зависят цены на энергоносители для Северной Европы), уместно придерживаться взвешенной позиции и предполагать, что в Гольфстриме действительно происходят краткосрочные изменения, отражающие стохастический характер природных процессов, однако долгосрочная тенденция остается не ясной. Не ясной потому, что поныне дискутируется вопрос о природе данного течения (см., например, работы А.Л.Бондаренко [1]).

Надо признать, что вообще ситуация с крупномасштабными течениями в атмосфере и океане, которые определяют климатическую картину на планете, остаётся трудной. Обратимся, например, к циркуляции водных масс в Южном океане. Там Антарктическое циркумполярное течение (АЦТ) парадоксальным образом охватывает всю толщу вод вплоть до дна, причём в некоторых местах у дна наблюдаются потоки со скоростями до 70–80 см/с [2]. В атмосфере данное течение сопровождается многочисленными циклонами «ревущих сороковых». Собственно, циклонную природу можно усматривать и за АЦТ, так как на высоких широтах водные массы Южного океана демонстрируют противотечение вдоль побережья Антарктиды. Но самое удивительное, что и в Северном полушарии можно указать симметричные течения вихревого характера: в Атлантике – Гольфстрим, замыкаемый на Севере Гренландскими течениями, а в Тихом океане – Северо-Тихоокеанское течение, замыкаемое Алеутским течением. На континентах же средние широты известны как широты повышенной тектонической активности. Создаётся впечатление, что к земному шару приурочено обращающееся вместе с ним линейное вихревое поле не ясной природы, ось которого смещена относительно земной оси и выходит своими оконечностями в средние широты.

### 1. Динамика планетных атмосфер

Большое видится издалека – обратимся поэтому к космическим данным по динамике оболочек нашей и других планет. Начнём с атмосферы Венеры. Сегодня уместно вспомнить, что атмосферу на Венере открыл Михайло Ломоносов, наблюдая рефракцию солнечных лучей при схождении Венеры с диска Солнца во время солнечного затмения. В труде 1761 года он впервые в мировой науке пишет: «Планета Венера окружена знатною воздушною атмосферою, таковою (лишь бы не большею), какова обливается около нашего шара земного». А спустя 200 лет советские межпланетные станции «Венера-4, 7 и 8», затем американские аппараты «Маринер-5 и -10» исследовали облачный покров Венеры и, в частности, измерили скорость движения облаков вдоль экватора. Она оказалась равной 100 м/с. Свежие же данные говорят, что облачный покров опережает поверхность Венеры с чудовищной скоростью в 700 м/с.

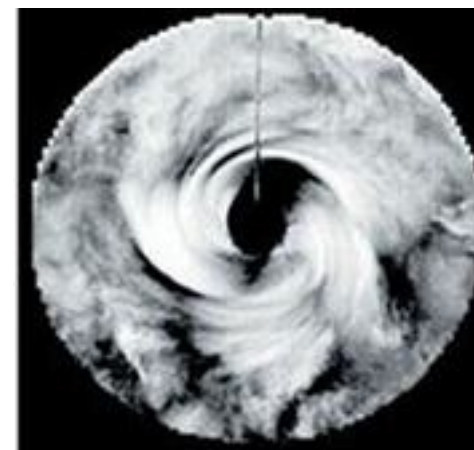


Рис. 1. Глаз урагана на Южном полюсе Венеры

Однако на этом сюрпризы Венеры не закончились. В 2006 году аппарат Европейского космического агентства Venus Express передал изображение Южного полюса Венеры с вихревой воронкой диаметром до 2 тыс. км [3]. Она напоминает «глаз урагана», но на Земле ураганы перемещаются по планете, здесь же он привязан к полюсу. Причём, как показала съёмка в ИК области, в это течение вовлечена практически вся толща атмосферы глубиной в 100 км. Планетологи всего мира находятся в растерянности, – и есть от чего. Согласно современной теории атмосферы, зональные течения полностью определяются меридианным градиентом температур и скоростью вращения планеты. На Венере градиент температур между экватором и полюсом составляет всего лишь 12°. А если учесть, что масса атмосферы Венеры на два порядка больше массы земной атмосферы, а угловая скорость вращения на два порядка меньше земной, то перед динамикой венерианской атмосферы приходится развести руками.

Итак, неведомые современной науке силы поддерживают на полюсах Венеры вечные циклоны и заставляют с огромной скоростью вращаться её атмосферу, при этом и сама она медленно вращается в том же направлении. На ум приходит модель дрейфового, вихревого вращения планет по Декарту. Венера и её оболочки, видимо, вращаются вихревым приводом. Но после трёхсот лет торжества ньютоновской инерциальной системы мира в это трудно поверить! Не может ли это быть какой-то аномалией, ведь на полюсах Земли таких циклонов нет? Наоборот, у нас на высоких широтах атмосфера, океаны и льды циркулируют в антициклональном направлении. За ответом обратимся к планетам гигантам.

Как известно, на экваторе Юпитера атмосфера движется на восток с опережающей скоростью до 150 м/с, демонстрируя, как и на Венере необъяснимую суперротацию. А в 2000 году по боковым снимкам с американского зонда Cassini были синтезированы изображения полярных зон Юпитера с циклонами венерианского типа. То есть, видимо, Юпитер, как и Венера, вращается не по инерции, а по Декарту. Но то же и на Сатурне. Давно известно, что его атмосфера на экваторе имеет необъяснимую суперротацию со скоростью 500 м/с. И совсем недавно зонд Cassini открыл циклоны с поперечником в несколько тысяч километров на обоих полюсах Сатурна [4]. При этом для циклона на Южном полюсе удалось получить профиль азимутальной скорости течения [5]. На границе ядра вязкого турбулентного вихря скорость течений составляет несколько сот метров в секунду.

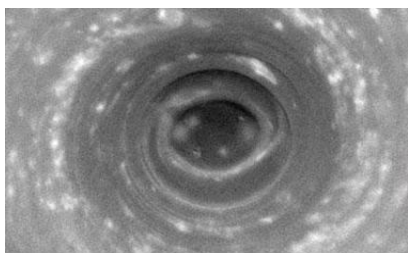


Рис. 2. Глаз урагана на Южном полюсе Сатурна

На Земле подобные ураганы, к счастью, не случаются. Вообще, на Земле атмосфера более спокойная, чем на других планетах, и этой возможностью существовать в мягких атмосферных условиях мы обязаны Луне. Но прежде, чем вернуться к динамике земных оболочек, сделаем очень важную оговорку. Все приведённые ранее значения скоростей порядка 100 м/с относились к атмосферам, к веществу или к «собственной материи», по Ломоносову. «Посторонняя материя», или космический эфир, движется с гораздо большими скоростями, но из-за своей эфемерности – его плотность на 2,5 порядка меньше, чем у воздуха – он лишь частично увлекает атмосферу. На экваторе, например, Сатурна эфир имеет скорость примерно 25 км/с – это первая космическая скорость для Сатурна. Ведь эти течения поддерживают не только вращение планеты и зональные течения атмосферы, но обеспечивают и обращение регулярных спутников Сатурна, и обращение его колец. То есть, вихревой привод – это принадлежность всей системы: планета-спутники. Особенно ярко это проявляется в системе Земля-Луна.

## 2. Вихревые аспекты динамики атмосферы и океана

В движениях земной атмосферы имеются три существенных отличия. Разумеется, аналогично Венере, Юпитеру и Сатурну атмосфера Земли опережает поверхность планеты и движется на восток, но скорость этого движения очень мала – порядка 7 м/с [6]. При этом атмосфера нашей планеты характеризуется большой изменчивостью направления ветра и случайным его распределением. Такое впечатление, что вихревой механизм, вращающий атмосферу Земли, демонстрирует некоторую неустойчивость, переменность. Имеется и ещё одно отличие. Как отмечено выше, в Арктике и Антарктике наблюдаются не циклоны, но антициклоны: воды, льды и атмосфера движутся не на восток, а на запад.

Своеобразие Земли целиком обусловлено наличием у неё относительно близкого и тяжёлого спутника. Именно Луна отвечает за перечисленные особенности атмосферных и океанских течений на Земле. Вообще говоря, предположения о том, что океанические и геодинамические феномены коррелируют с фазой Луны, высказывались уже не раз. И разрушительное цунами 2004 года в Юго-Восточной Азии, и землетрясение на Гаити 2010 года случились в полнолуние, но механизм корреляции остаётся не ясен.

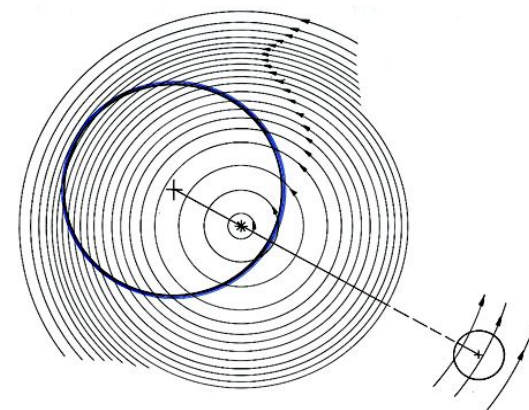


Рис. 3. Схема вихревого привода ротации Земли (её центр отмечен крестом) и обращения Луны (внизу справа). Баричесентр системы отмечен звёздочкой. Профиль скорости течений условно показан стрелками на линиях течений.

Мы подошли к центральному пункту данной статьи. Выше уже отмечалось, что вихревой привод вращения планеты принадлежит и её спутникам, коль скоро он поддерживает их обращение вокруг планеты. При этом в спутниковых системах ось вихревого привода приурочена к центру тяжести или баричесентру системы. Баричесентрическое расположение оси вихревого привода объясняется космохимической природой последнего. Во второй половине 19-го века В.Томсон (Кельвин) высказал гипотезу о том, что атомы представляют собой вихревые, или как говорят сейчас, спиновые структуры [7]. В соответствии с теоремой Гельмгольца о сохранении завихренности, генерация химических элементов в первичной магме ранней планеты и на её спутнике – будущей Луне – сопровождалась порождением

компенсационной завихренности противоположного знака. В ходе обратного каскада и диффузии этой завихренности сформировался вязкий вихрь с кеплеровым участком профиля, простирающимся до лунной орбиты. Ось вихря приурочена к барическому центру системы Земля-Луна, поэтому каждое из тел дрейфует вокруг общего центра тяжести и одновременно подкручивается вихревым потоком.

Так как вихревая ось смещена с центра Земли на 4640 км, то её оконечности выходят в земные оболочки в зоне средних широт. Отсюда «ревушие 40-е» в атмосфере и океане и повышенная тектоническая активность на средних широтах. При вращении Земли ось привода, привязанная к плоскости эклиптики, пробегает в её теле, что обнаруживается по циклонам Южного океана, хорошо заметным из космоса [8]. Каждая точка в оболочке Земли находится в поле вихревых течений, изменяющихся с периодом около 25 часов (это синодический период обращения Луны вокруг Земли). И всё живое и неживое испытывает переменные сдвиговые напряжения. Кстати, с этим периодом связаны циркадные ритмы в физиологии растений, животных и человека.

Становится понятным, почему в отличие от Венеры у нас на Южном полюсе антициклон. При смещённой вихревой оси высокие широты как на юге, так и на севере Земли, оказываются в зоне обратных течений вихревого привода. Поэтому у побережья Антарктиды наблюдается прибрежное течение антициклонального направления, а в атмосфере поддерживается устойчивый антициклон. Аналогично на севере. Воды и льды СЛО закономерно демонстрируют преимущественно антициклональный дрейф. Но с другой стороны, льды – это уже не воздух и вода. По своим свойствам льды приближаются к геологической породе. Так что наши догадки о эфирно-вихревой природе геодинамики получают первое и далеко не последнее подтверждение. Эфир – это, конечно, довольно эфемерная жидкость, но течения этой проникающей жидкости способны на временах геологического или космогонического масштаба развить заметные сдвиговые напряжения в геологической породе. Из-за приливных эффектов тело нашей планеты отстаёт от течений вихревого привода. Отсюда сейсмичность, её связь с фазами Луны, сезонные зависимости и пр. Предлагаемая картезианская модель ротации нашей планеты объясняет прецессию земной оси, чандлеровские колебания и наличие пассатов.

### Заключение

Вращение планет солнечной системы, видимо, поддерживается течениями эфирных вихрей космохимического происхождения. Об этом свидетельствует суперротация на низких широтах и наличие циклонов в приполярных зонах. На Земле особенности проявления вихревого привода ротации объясняются наличием тяжёлого и близкого спутника – Луны. Смещение оси вихревого привода приводит к тому, что в отличие от Венеры, Юпитера и Сатурна на Земле в приполярных зонах наблюдаются обратные течения атмосферы, вод и льдов. Изображения полярных зон Урана и Нептуна пока не получены, но характер зональной циркуляции их атмосфер, в частности, наличие обратных «пассатов» сближает их скорее с Землёй, чем с Юпитером или Сатурном.

К поиску космохимического механизма вращения Земли неоднократно призывает Н.Н.Парийский [9]. По его оценкам, вековое замедление вращения Земли (удлинение суток на 1,6 мс за сто лет) необъяснимо мало в свете значительного приливного торможения. Приводились также доводы в пользу того, что Земля даже

ускоряет своё вращение. Newton пришёл к такому выводу после критического анализа данных по вековым ускорениям Земли и Луны. Он обнаружил сокращение суток на 3,2 мс за сто лет [10].

Хотелось бы подчеркнуть, что М.В.Ломоносов в течение пяти (!) лет ставил опыты по обнаружению неинерциального механизма вращения Земли, понимая, что инерциальные движения возможны только теоретически. В реальности все движения имеют трансляционный, дрейфовый характер. Ныне его предвидение подтвердилось. О наличии картезианского привода на Земле свидетельствует тот не случайный факт, что все три оболочки – литосфера, гидросфера и атмосфера – демонстрируют общие – гидродинамические – формы перемещения масс и общие широтные зависимости, вплоть до того, что зона повышенной активности для всех трёх оболочек одна и та же – это средние широты. Ранее мы сообщали, что имеются очень убедительные признаки вихревой, дрейфовой природы обращения планет вокруг Солнца [11]. Теперь становится ясным, что глобальный эфирный вихрь солнечной системы и вихревые приводы ротации планет и обращения их спутников образует единую вихревую гидродинамическую структуру. Её происхождение связано с космогоническими процессами, рассмотрение которых мы отложим на будущее.

В том что касается физики планет, картезианство, приверженцем которого был Михайло Ломоносов, таит в себе значительный прогностический потенциал. Так, понимание сдвигово-ротационных причин геодинамических процессов открывает новые возможности в сфере предсказания тектонических подвижек. Корреляционная связь землетрясений с положением Луны ранее была установлена [12], однако её физические основания оставались скрыты.

Возвращаясь к проблеме эволюции крупномасштабных течений, можно заключить, что их долговременные изменения целиком определяются эволюцией вихревого привода ротации. Признаком такой эволюции могли бы служить изменения орбиты Луны, за которыми скрываются соответствующие смещения и поворот оси вихревого привода. Последние связаны с тектонохимическими, в частности, магматическими процессами, приводящими к изменению суммарной завихренности, сконцентрированной в вихревом приводе ротации планеты.

Наконец, открытие физического механизма зональных крупномасштабных течений атмосферы и океана позволяет наметить направление исследования причин суровой зимы 2009 и жаркого лета 2010 годов. Для этих аномалий было характерно преобладание меридианного переноса атмосферы над зональным. Они не случайно совпали с затянувшимся периодом низкой солнечной активности. Климатологи вспоминают в связи с этим малое оледенение в Европе 1645–1715 гг., также совпавшее с периодом спокойного Солнца. Физические причины данных корреляций, как и природа циклов солнечной активности остаются скрыты. И здесь картезианство также способно сказать своё веское слово. Но это уже тема другой статьи.

### **Литература**

1. *Бондаренко А.Л.* Настоящее и будущее Гольфстрима // *Природа*. 2007. № 7. С. 29–37.
2. *Саруханян Э.И., Смирнов Н.П.* Водные массы и циркуляция Южного океана. Л.: Гидрометеиздат. 1986. 288 с.

3. [www.planetary.org/blog/article/00002679/](http://www.planetary.org/blog/article/00002679/)
4. [www.sciencedaily.com/releases/2006/11/06110913492/](http://www.sciencedaily.com/releases/2006/11/06110913492/)
5. Dyudina, U.A. et al. Dynamics of Saturn's South Polar Vortex // Science. 2008, vol. 319, no. 5871, pp. 1801–1803.
6. Сидоренков Н.С. Атмосферные процессы и вращение Земли. С-Пб: Гидрометеоиздат. 2002. 367 с.
7. Thomson W. On the vortex atoms // Phil. Mg. Ser. 4. 1867, vol. 34, pp. 15–24.
8. [www.astronet.ru/db/msg/1161809](http://www.astronet.ru/db/msg/1161809)
9. Парийский Н.Н., Кузнецов М.В., Кузнецова Л.В. О влиянии океанических приливов на вековое замедление вращения Земли // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1972. № 2. С. 3–12.
10. Newton R. Secular acceleration of the Earth and Moon // Science. 1969, vol. 166, no. 3907, pp. 825–831.
11. Низовцев В.В., Панченко О.В. Вихревая модель солнечной системы // Физические проблемы экологии. Ред В.И. Трухин. 2001. № 7.
12. Булатова Н.И. Широконое распределение сейсмичности Земли в зависимости от положения Солнца и Луны // Вулканология и сейсмология. 2005. № 2. С. 57–78.

УДК 535.372

#### СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КОНЦЕНТРАЦИИ КЛЕТОК ВОДОРОСЛЕЙ В СУСПЕНЗИЯХ С КОРРЕКЦИЕЙ НА СВЕТОРАССЕЯНИЕ

Пацаева С.В., Полякова И.Б., Хунджуа Д.А., Южаков В.И.

*Кафедра общей физики,  
Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова*

Работа посвящена разработке алгоритма оценки численности клеток водорослей с использованием спектров поглощения и люминесценции на примере двух типов зелёных водорослей *Chlorella vulgaris* и *Scenedesmus quadricauda* в условиях существенного светорассеяния на клетках.

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при проведении биологических исследований для определения численности клеток фотосинтезирующих микроорганизмов чаще всего применяется подсчёт клеток на специальных счётных стёклах под микроскопом [1]. Как правило, такой подсчёт является длительным и трудоёмким процессом. В то же время спектральные методы отличаются быстротой, высокой чувствительностью и возможностью их применения без разрушения объекта исследования [2-5]. Именно поэтому весьма актуальной является разработка методов диагностики биологических объектов *in situ* и *in vivo*, а их применение – важным для решения многих экологических задач. Например, в [2] предложен метод определения физиологического состояния зелёных растений и водорослей по спектрам флуоресценции хлорофилла *in vivo*.

Несмотря на успешное развитие методов спектрального анализа биологических объектов, изучение их оптических свойств встречает ряд трудностей [6-7], некоторые из которых связаны со специфическими свойствами биологических

сред. Основной отличительной особенностью биологических сред по сравнению с модельными истинными растворами и однокомпонентными жидкостями является их неоднородный характер, обусловленный клеточным строением живой материи. Он выражается в различном качественном и количественном составе внутриклеточной и межклеточной среды. Следствием этого являются пространственные изменения ряда локальных оптических характеристик биообъекта (показатель поглощения и показатель преломления) с характерным масштабом, соответствующим размеру клетки.

Существуют различные аппаратурно-методические приёмы для уменьшения светорассеяния, для работы с образцами, имеющими слишком большую или, наоборот, слишком малую величину оптической плотности. Некоторые из них основаны на применении специально разработанной аппаратуры [7]. Для регистрации больших оптических плотностей используют, например, методы отражения, нарушенного полного внутреннего отражения, специальные оптические кюветы. В ряде случаев светорассеяние частично снижается добавлением к объекту веществ, увеличивающих показатель преломления среды (сахарозы, глицерина), что приводит к уменьшению разницы показателей преломления раствора и содержащихся в нём рассеивающих частиц (митохондрий, хлоропластов, форменных элементов крови, клеток водорослей или бактерий и др.) [8].

Целью данной работы была разработка методики оценки численности клеток по спектрам поглощения и люминесценции водорослей, измеренным с использованием стандартных спектральных приборов и оптических кювет с длиной оптического пути 1 см, в условиях существенного светорассеяния без какой-либо предварительной обработки суспензии. Объектами исследования были выбраны два типа зелёных водорослей *Chlorella vulgaris* и *Scenedesmus quadricauda*, которые часто используются как тест-объекты при проведении биотестирования проб воды и почвы на общую токсичность [9-10].

#### Фотосинтетический аппарат клеток водорослей

Фотосинтез является основой существования жизни на Земле, занимая центральное место в круговороте вещества и энергии. Благодаря этому сложному процессу углерод становится доступным для организмов, а в атмосферу выделяется кислород, причём эта реакция является единственным источником кислорода на Земле. Фотосинтез осуществляют высшие растения, водоросли и некоторые виды бактерий. Суммарный процесс фотосинтеза включает в себя две взаимосвязанные стадии: световую и темновую [11]. В световой стадии происходит поглощение света пигментами, миграция энергии электронного возбуждения к реакционным центрам (РЦ), перенос электронов по цепи электронного транспорта и сопряжённые с ним процессы. Как в зелёных растениях, так и в водорослях все световые и часть темновых стадий фотосинтеза протекают в субклеточных частицах – хлоропластах, имеющих высокоупорядоченную внутреннюю структуру. В высших растениях хлоропласты имеют цилиндрическую форму длиной примерно 5-10 мкм и диаметром 0,5-2 мкм [12]. Внутри хлоропласта находится строма, в которой протекают темновые стадии фотосинтеза, и ламеллярная система, образованная мембранами тилакоидов. В ней происходят световые стадии фотосинтеза. Различают тилакоиды гран, которые уложены в стопки, и тилакоиды стромы, являющиеся продолжением тилакоидов гран. На один хлоропласт приходится 40-80 тилакоидов



гран. В одном тилакоидном диске функционируют в среднем 200 цепей электронного транспорта и находится  $10^5$ - $10^6$  молекул пигментов.

Хлоропласты водорослей имеют некоторые особенности. Они чрезвычайно разнообразны по форме, размерам, числу в клетке, организации тилакоидов, по цветовой гамме, определяемой пигментным составом. Клетки водорослей содержат или один хлоропласт, или несколько: от двух до трёх десятков (50-80 в молодых и 200-300 в старых) [1-3]. Из разных видов водорослей наиболее близки по своей структуре к высшим растениям зелёные водоросли. У них, в отличие, например, от красных, образуются пачки из двух-шести и более тилакоидов, упакованные в граноподобные образования.

Основную роль в процессах фотосинтеза играют системы пигментов, являющиеся первичными акцепторами энергии, осуществляющими её дальнейшее преобразование. Основными фотосинтетическими пигментами являются хлорофиллы (*a, b, c, d, e*), каротиноиды и фикобилины. Все фотосинтезирующие организмы, от бактерий и водорослей до высших растений, содержат в качестве универсального пигмента хлорофилл *a* (Хл *a*). Хл *a* является основным флуоресцирующим веществом у растений. Свет может поглощаться либо непосредственно молекулами хлорофилла, либо вспомогательные пигментами, которые передают 80-100% поглощённой ими световой энергии. Молекула хлорофилла *a* обладает комплексом физико-химических свойств, необходимых для выполнения функций поглощения и преобразования энергии в фотосинтезе. Максимум поглощения Хл *a* в органических растворителях 660-664 нм. В высших растениях и в зелёных водорослях, кроме того, присутствует дополнительный пигмент – хлорофилл *b*. Максимум поглощения сдвинут в более коротковолновую область (в ацетоне, спирте) – 645 нм [14]. В талломах морских зелёных водорослей отношение Хл *a*/Хл *b* составляет около 1,5-2,2 вместо 3 у высших растений [цит. по 14].

Форма, число и структура хлоропластов в клетке связаны с условиями роста и существования клеток водорослей. При длительном истощении в темноте в клетках *Chlorella* хлоропласт уменьшается, а митохондрии увеличиваются в размере, появляются крупные вакуоли [15]. У *Euglena* в темноте тилакоиды теряют упорядоченность, набухают и вакуолизируются, затем разрушаются сами хлоропласты, хотя полной деструкции не наступает [цит. по 14]. У *Chlorella pyrenoidosa* типичная структура гран проявляется при культивировании на среде только с низким (0,03%) содержанием  $CO_2$  [13].

При поглощении квантов света перенос электрона последовательно осуществляется двумя фотосистемами (ФС): ФС2, поглощающей свет с  $\lambda < 690$  нм, и длинноволновой ФС1, поглощающей свет с  $\lambda < 710$  нм. Каждая ФС представляет собой обособленную структуру ламеллярной мембраны. Большие хлорофилл-белковые субъединицы реакционного центра (РЦ) функционируют как антенны – с максимумом флуоресценции при 686 нм и как фотохимический центр – с максимумом флуоресценции при 695 нм. К настоящему времени проведено достаточно большое количество исследований, связанных с устройством фотосинтетического аппарата [16,17] и функционированием фотосинтетической системы растений [18-20]. Комплексы каждой из ФС имеют как собственные хлорофилльные антенны (20-40 молекул Хл *a*), так и периферические, образованные светособирающим комплексом (ССК). В ССК сосредоточена примерно половина находящегося в хлоропластах Хл *a* и практически весь Хл *b* [21]. Количество хлорофилла и соот-

ношение его форм зависит от условий выращивания или обитания. Наблюдения за изменениями содержания хлорофиллов *a* и *b* в процессе роста растения показывают, что сначала формируются ФС1 и ФС2, а затем светособирающий комплекс; различные формы хлорофилла *a* последовательно встраиваются в мембраны. В свою очередь, образование реакционных центров ФС2 происходит на более поздних этапах формирования электрон-транспортных цепей хлоропластов, чем РЦ ФС1. Эти данные суммированы в [22].

Кроме хлорофилла, функции фоторецепторов выполняют вспомогательные пигменты растений и водорослей – каротиноиды и фикобилипротеины. Каротиноиды, кроме того, передают дополнительную энергию хлорофиллу (в зелёных водорослях с эффективностью ~50%), установлено их участие в защите клеток от фотоокисления и в процессах выделения кислорода. Они имеют максимум поглощения света в более коротковолновой области спектра (450-500 нм), чем хлорофиллы. Каротиноиды часто маскируют зелёный цвет хлорофиллов, окрашивая клетки в различные оттенки желтоватых и коричневатых тонов. Фикобилипротеины также выполняют важную функцию улавливания света, недоступного хлорофиллам (545-675 нм). Форма спектров поглощения и флуоресценции специфична для зелёных, красных и бурых морских водорослей, так как определяется их пигментным составом.

Поскольку спектры поглощения и спектры флуоресценции клеток растений зависят от строения и состояния фотосинтетического аппарата, для анализа физиологического состояния фотосинтетического аппарата используют спектральные методы [23]. Многочисленные внешние факторы (большие перепады температур, соли тяжёлых металлов, избыточная освещённость и др.) могут привести к необратимым изменениям фотосинтетического аппарата растений и водорослей. Наиболее чувствительным в этом отношении является ФС2, ответственная за разложение воды и выделение кислорода. В клетке в основном флуоресцирует хлорофилл ФС2. Поэтому именно изменения его флуоресценции говорят о состоянии реакционных центров этой фотосистемы. Например, среди тяжёлых металлов, поступающих в окружающую среду с промышленными стоками, одним из наиболее фитотоксичных является медь [24], блокирующая транспорт электронов на разных участках электронтранспортной цепи. В [25] установлено, что под влиянием данного токсиканта у *Chlorella vulgaris* на свету происходило увеличение доли неактивных РЦ ФС2 за счёт замедления репарационных процессов.

Величина флуоресценции хлорофилла зависит так же и от того, в каком состоянии находятся РЦ – открытом (рабочем) или в закрытом. В открытом состоянии большая часть поглощённой энергии используется в процессе фотосинтеза. Поэтому интенсивность флуоресценции в клетке меньше, чем в растворе. Существуют различные механизмы тушения флуоресценции [19]. В экстремальных условиях, даже в клетке, флуоресценция может возрасти за счёт нарушения согласованной работы элементов цепи электронного транспорта. Например, в условиях повышенной освещённости или при добавлении некоторых веществ, ингибирующих поток электронов [14,17].

К настоящему времени для количественной оценки формы спектра используются различные параметры. Так, в [2] введён параметр  $\omega$ , равный отношению интенсивностей длинно- и коротковолновой полос флуоресценции хлорофилла с



максимумами соответственно 730 и 680 нм:  $\omega = F_{730}/F_{680}$ . На большом числе объектов показано, что величина параметра  $\omega$  является интегральным показателем физиологического состояния и фотосинтетической активности растения. Похожий флуоресцентный параметр – отношение интенсивностей флуоресценции на 740 и 685 нм – используется авторами [26] для оценки содержания хлорофилла в листьях дерева гингко.

Методы биомониторинга позволяют определять интенсивность и качество реакций живых организмов на изменение среды обитания [4]. В природных водоёмах различные антропогенные загрязнения могут оказать угнетающее воздействие на фотосинтетический аппарат водорослей, что приведёт к уменьшению продуктивности всей водной экологической системы.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Объекты и методы

Культуры водорослей *Chlorella vulgaris* и *Scenedesmus quadricauda* были выращены и предоставлены для измерений сотрудниками лаборатории экотоксикологического анализа почв Факультета Почвоведения МГУ им. М.В.Ломоносова. Максимальная концентрация водорослей в экспериментах составляла 41,3 млн клеток/мл для *Chlorella vulgaris* и 1,97 млн клеток/мл для *Scenedesmus quadricauda*. Культуры водорослей разбавлялись питательной средой для получения образцов с различной концентрацией клеток.

Спектральные измерения проводились на флуориметре CM 2203 и спектрофотометре Unicо в стандартных кварцевых кюветках с длиной оптического пути 10 мм при температуре  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . Спектры оптической плотности суспензий клеток измерялись по отношению к питательной среде.

### Спектры оптической плотности суспензий клеток

Типичные спектры оптической плотности суспензий клеток водорослей приведены на рис. 1-2, которые наглядно демонстрируют необходимость учёта светорассеяния при применении использования величины оптической плотности суспензии для метода количественной диагностики водорослей. На спектрах оптической плотности суспензий клеток видны не только полосы поглощения света пигментами водорослей (каротиноидов в спектральной области 400-550 нм и хлорофилла в области 650-700 нм), но и преобладающее по величине в спектре и уменьшающееся с ростом длины волны светорассеяние.

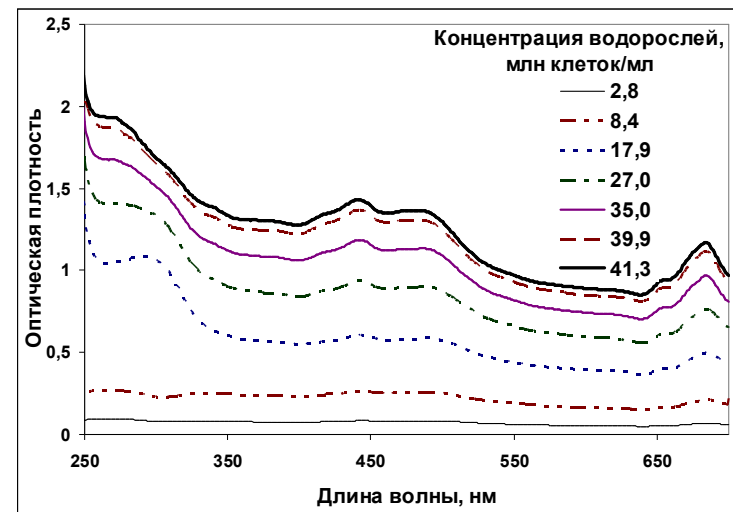


Рис. 1. Спектр оптической плотности суспензии клеток культуры *Chlorella vulgaris* различной концентрации. Концентрации клеток приведены в млн/мл.

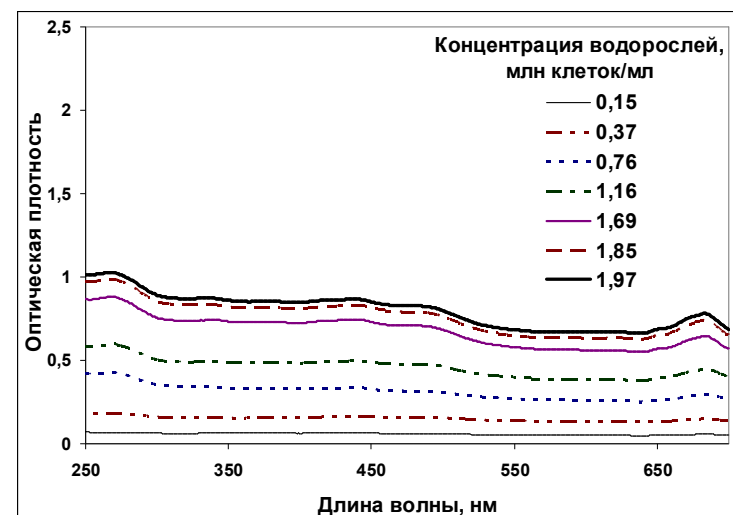


Рис. 2. Спектр оптической плотности суспензии клеток культуры *Scenedesmus quadricauda* различной концентрации. Концентрации клеток приведены в млн/мл.

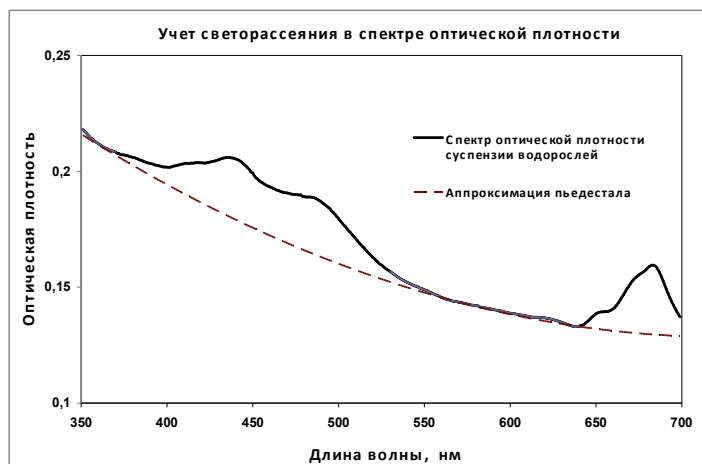


Рис. 3. Спектр оптической плотности суспензии клеток культуры *Chlorella vulgaris* с аппроксимирующей линией для светорассеяния.

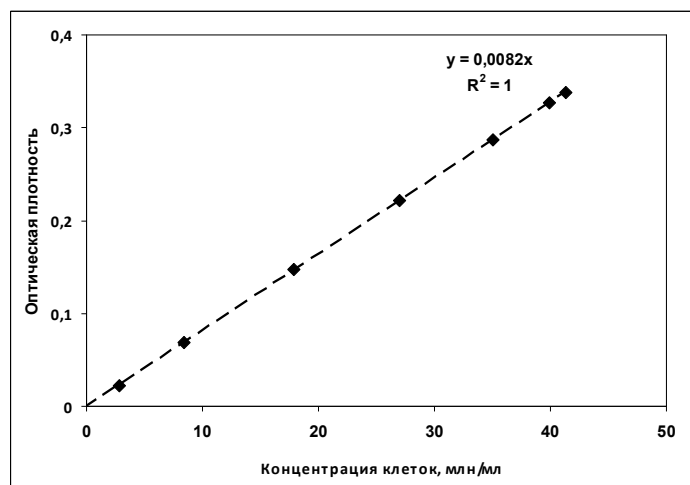


Рис. 4. Зависимость оптической плотности в области поглощения хлорофилла с учётом светорассеяния от концентрации клеток культуры *Chlorella vulgaris* в суспензии.

Визуально можно оценить, что относительный вклад светорассеяния в общую величину оптической плотности больше для культуры *Scenedesmus quadricauda*, чем для *Chlorella vulgaris*. Это связано с тем, что клетки *Scenedesmus* крупнее, чем клетки *Chlorella*.

Для разработки алгоритма оценки численности клеток необходимо было найти оптимальный метод учёта «пьедестала» в спектре, возникающего в результате рассеяния света на клетках культуры водоросли. При подборе функции для аппроксимации «пьедестала» использовали значения той части спектра, в которой не проявляется поглощение пигментов (соответственно 350-370 нм и 530-640 нм). В результате проверки различных аппроксимирующих функций установлено, что для спектров такого вида наиболее подходящей является квадратичная функция (см. рис. 3). Однако для рутинной обработки спектров поглощения можно использовать аппроксимацию «пьедестала», вызванного светорассеянием, линейной функцией как наиболее простой, и дающий относительную погрешность всего 5%.

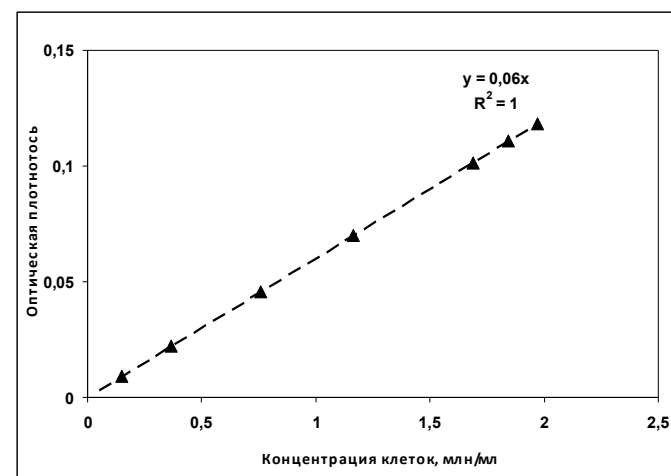


Рис. 5. Зависимость оптической плотности в области поглощения хлорофилла с учётом светорассеяния от концентрации клеток культуры *Scenedesmus quadricauda* в суспензии.

Как показывают рис. 4-5 зависимости поглощения хлорофилла от концентрации клеток после учёта светорассеяния получились линейными для обеих культур водорослей во всем исследованном диапазоне концентраций с коэффициентами корреляции  $R^2=0,9937$  для *Chlorella vulgaris* и  $R^2=0,9967$  для *Scenedesmus quadricauda*. Коэффициент линейной регрессии получился примерно в 7 раз больше для *Scenedesmus quadricauda*, поскольку клетки этой водоросли крупнее и содержат больше хлорофилла по сравнению с клетками *Chlorella vulgaris*.

#### Спектры флуоресценции суспензий водорослей

На рис. 6-7 показаны типичные спектры флуоресценции при возбуждении длиной волны 620 нм. На этих спектрах максимум на длине волны  $\lambda = 685$  нм соответствует свечению хлорофилла *a*. Интенсивность флуоресценции как в максимуме полосы, так и интегральная по спектру возрастают с увеличением концентрации клеток в пробе.

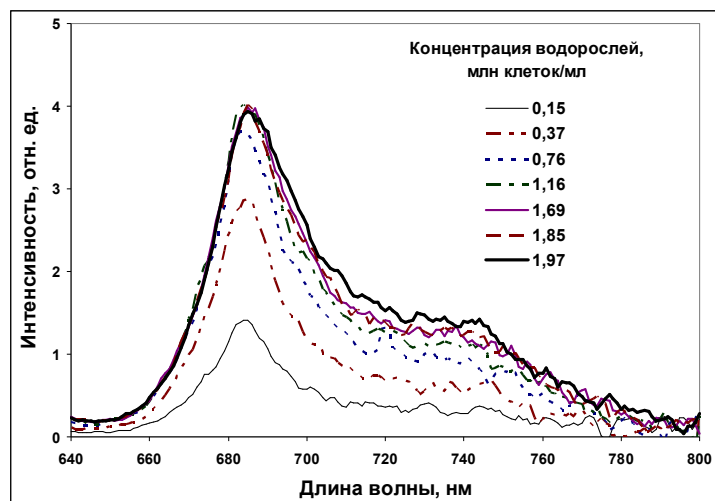


Рис. 6. Спектры флуоресценции для суспензии культуры *Chlorella vulgaris*. Длина волны возбуждения 620 нм.

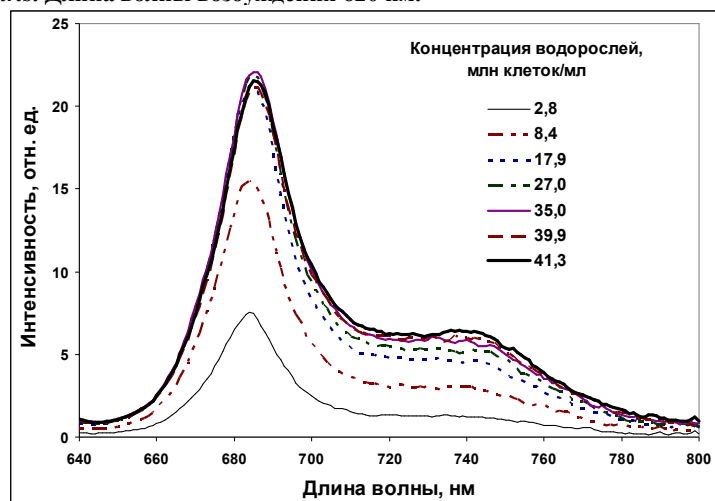


Рис. 7. Спектры флуоресценции для суспензии культуры *Scenedesmus quadricauda*. Длина волны возбуждения 620 нм.

Однако зависимости интенсивности испускания от концентрации клеток перестают быть линейными для проб с оптической плотностью, превышающей 0,1 (см. рис. 8-9), так как происходит значительное ослабление возбуждающего света из-за наличия светорассеяния. Такому значению оптической плотности соответствуют численности клеток: *Chlorella vulgaris* – 12 млн клеток/мл, *Scenedesmus quadricauda* – 1,7 млн клеток/мл. Разница в концентрации клеток, соответствующую

щей оптической плотности 0,1, для двух культур водорослей объясняется различием в размерах их клеток. Типичный размер клеток *Chlorella vulgaris* 5-10 мкм. *Scenedesmus* образует ценобии (колонии) из 4-16 продолговатых клеток длиной 27 мкм и шириной 7 мкм, соединённых боковыми стенками [27].

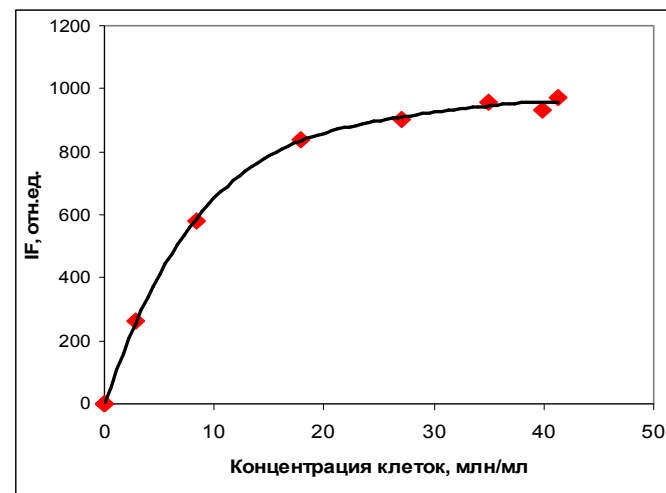


Рис. 8. Зависимость интегральной по спектру интенсивности флуоресценции IF хлорофилла в суспензии культуры *Chlorella vulgaris* от концентрации клеток.

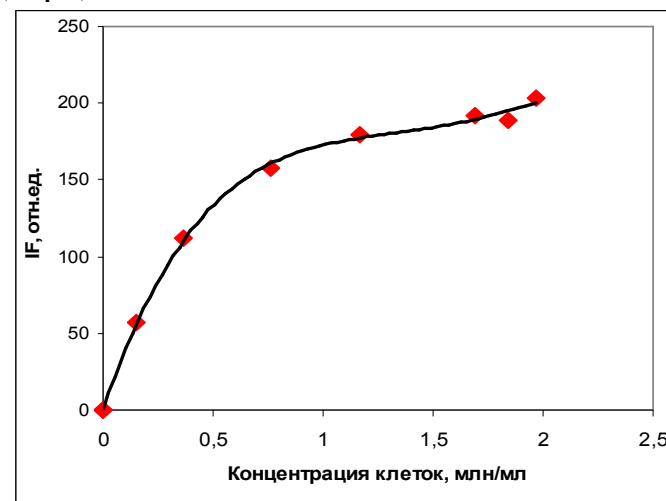


Рис. 9. Зависимость интегральной по спектру интенсивности флуоресценции IF хлорофилла в суспензии культуры *Scenedesmus quadricauda* от концентрации клеток.

При возрастании концентрации клеток отмечается не только рост интенсивности флуоресценции, но и изменение формы полосы испускания хлорофилла. При больших концентрациях клеток отношение интенсивностей длинноволновой полосы флуоресценции (740 нм) и коротковолновой (685 нм) равно приблизительно 0,3, при малых концентрациях оно стремится к 0,17. Такое изменение формы спектра мы объясняем более значительным поглощением коротковолновой флуоресценции клетками суспензии водорослей по сравнению с длинноволновой из-за перекрывания спектра поглощения и испускания хлорофилла (ср. рис. 1-2 и 6-7).

Отметим, что исследование проводилось на двух лабораторных культурах водорослей, концентрацию которых изменяли разбавлением питательной среды, т.е. клетки водорослей в разных пробах были одной и той же фазы роста и в одном и том же физиологическом состоянии. Как было отмечено во введении, отношение интенсивностей длинноволновой и коротковолновой флуоресценции хлорофилла является интегральным показателем физиологического состояния и фотосинтетической активности растения, и поэтому может изменяться у клеток одной и той же культуры в зависимости от условия выращивания.

#### Коррекция флуоресценции на светорассеяние

Для того, чтобы концентрационные зависимости интенсивности флуоресценции можно было использовать для определения численности клеток, необходимо произвести коррекцию величины флуоресценции на светорассеяние на длине волны возбуждения. Для такой коррекции мы использовали формулу:

$$NF = IF / 10^{-0,5D}$$

где IF – интегральная по полосе испускания интенсивность флуоресценции хлорофилла, NF – флуоресценция после коррекции, D – значение оптической плотности на длине волны возбуждения для оптического пути 1 см. Величина 0,5 D соответствует ослаблению света при распространении от стенки до центра кюветы (0,5 см в нашем случае).

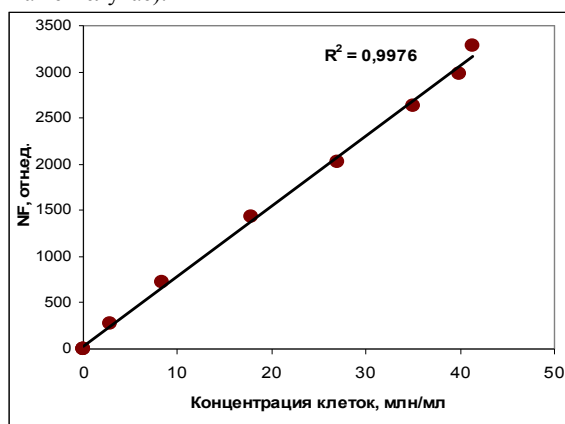


Рис. 10. Зависимость от концентрации клеток интенсивности флуоресценции NF хлорофилла после коррекции на светорассеяние для суспензии культуры *Chlorella vulgaris*.

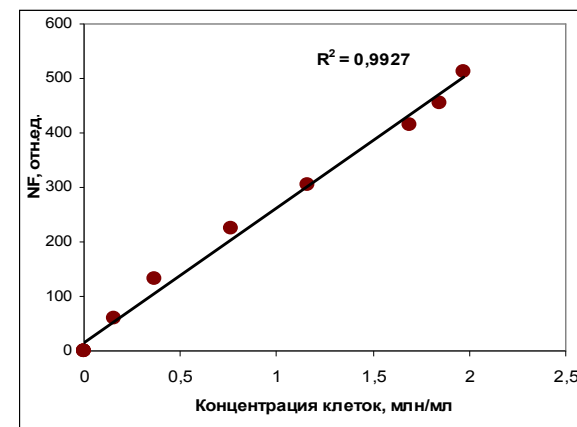


Рис. 11. Зависимость от концентрации клеток интенсивности флуоресценции NF хлорофилла после коррекции на светорассеяние для суспензии культуры *Chlorella vulgaris*.

Концентрационные зависимости флуоресценции после коррекции на светорассеяние возбуждающего излучения показаны на рис. 10-11. Как видно из рисунков, эти зависимости практически линейны (ср. с рис. 8-9) и могут использоваться для оценки концентрации клеток водорослей в большом диапазоне изменения концентрации: для культуры *Chlorella vulgaris* до 41 млн клеток/мл, для *Scenedesmus quadricauda* – 2 млн клеток/мл.

#### ВЫВОДЫ

В работе были измерены спектры поглощения и флуоресценции культуры зелёных водорослей *Chlorella vulgaris* и *Scenedesmus quadricauda*, рассмотрены различные методы обработки спектров.

Спектры оптической плотности суспензии культуры зелёных водорослей содержат полосы поглощения основных пигментов каротиноидов (400-550 нм) и хлорофилла (650-700 нм), но при этом существенный вклад вносит светорассеяние, убывающее с ростом длины волны. Для обработки спектров поглощения можно использовать метод аппроксимации линейной или квадратичной функцией «пьедестала», вызванного светорассеянием. Зависимости величины поглощения хлорофилла от концентрации клеток водорослей оказались линейными с коэффициентами доверия  $R^2=0,9937$  для *Chlorella vulgaris* и  $R^2=0,9967$  для *Scenedesmus quadricauda* во всем диапазоне концентраций клеточных культур, использованных в лабораторном эксперименте.

В спектрах флуоресценции максимум на длине волны  $\lambda = 685$  нм соответствует испусканию хлорофилла  $a$ , как основного флуоресцирующего вещества у растений. Зависимости интенсивности испускания от концентрации клеток перестают быть линейными для проб с оптической плотностью, превышающей 0,1. Однако предложенная коррекция флуоресценции на рассеяние света клетками, проведенная с учётом измеренных значений оптической плотности, показала линейность рассчитанных флуоресцентных характеристик от концентрации клеток во всем

диапазоне исследованных концентраций: *Chlorella vulgaris* до 41 млн клеток/мл, *Scenedesmus quadricauda* – 2 млн клеток/мл.

При возрастании концентрации клеток отмечается не только рост интенсивности флуоресценции хлорофилла, но и изменение формы его полосы испускания. При больших концентрациях клеток отношение интенсивностей длинноволновой полосы флуоресценции (740 нм) и коротковолновой (685 нм) равно приблизительно 0,3, при малых концентрациях оно стремится к 0,17 (при разбавлении двух лабораторных культур водорослей).

Авторы благодарят сотрудников лаборатории экотоксикологического анализа почв Факультета Почвоведения МГУ им. М.В.Ломоносова Терехову В.А. и Федосееву Е.В. за предоставленные пробы и обсуждение результатов измерений.

### Литература

1. Реунова Ю.А. Влияние селена на морфофункциональные характеристики морской одноклеточной водоросли *Dunaliella Salina* (*Chlorophyta*). Автореф. дисс. ... канд. биол. наук Владивосток, 2007. 22 с.
2. Асланиди К.Б., Шалапенко А.А., Карнаухов В.Н., Берестовская Н.Г., Шавкин В.И. Метод определения функционального состояния растений по спектрам флуоресценции хлорофилла (техника биомониторинга). Пушкино, 1988. 43 с.
3. Майор А.Ю. Лазерные измерительные системы для мониторинга фитопланктонных сообществ и процессов, влияющих на их состояние. Автореф. дисс. ... докт. техн. наук Владивосток, 2006. 39 с.
4. Рубин А.Б. Биофизические методы в экологическом мониторинге / Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. №4. С. 7-13.
5. Карнаухов В.Н. Спектральный анализ в клеточном мониторинге окружающей среды. Москва: Наука, 2001
6. Merzlyak M.N., Naqvi K.R. On Recording the True Absorption and Scattering Spectrum of a Turbid Sample: Application to Cell Suspensions of the Cyanobacterium *Anabaena variabilis* // J. Photochem. Photobiol. (B)/ 2000/ V. 58. P. 123-129.
7. Мерзляк М.Н., Чивкунова О.Б., Маслова И.П., Накви Р.К., Соловченко А.Е., Клячко-Гурвич Г.Л. Спектры поглощения и рассеяния света клеточными суспензиями некоторых цианобактерий и микроводорослей / Физиология растений, 2008. Т. 55, №3. С. 464-470.
8. Сидоренко В.М. Молекулярная спектроскопия биологических сред. Москва: Высшая школа, 2004
9. Жмур Н. С., Орлова Т. Л. Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из ночв, осадков сточных вод и отходов по измерению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей (ФР. 1.39.2001.00284).-М.: «Акварос», 2001.-43 с.
10. Маторин Д.Н., Погосян С.И., Смунов А.В. Оценка качества среды инструментальными методами с использованием фототрофных организмов. В кн.: Биологический контроль окружающей среды. Биоиндикация и биотестирование / Под ред. Мелехова О.П., Егорова Е.И. М.: Изд-во Академия, 2007. С. 243–246.

11. Клейтон Р. Фотосинтез. Физические механизмы и химические модели. М., Мир, 1984. 352 с.
12. Комов В.П., Шведова В.Н. Биохимия. М., Дрофа, 2004. 640 с.
13. Гавриленко В.Ф., Гусев М.В., Никитина К.А., Хоффман П. Избранные главы физиологии растений. М., Изд-во Моск. Университета. 1986. 440 с.
14. Рубин Б.А., Гавриленко В.Ф. Биохимия и физиология фотосинтеза. М., Изд-во Моск. Университета. 1977. 328 с.
15. Верзилин Н.Н., Ананьева Т.И. Действие длительного углеродного голодания на ультраструктуру клеток хлореллы. – В кн.: Электронная микроскопия в ботанических исследованиях. Рига. 1978.
16. Kühlbrandt W., Wang D.N., Fujiyoshi Y. Atomic model of plant light-harvesting complex by electron crystallography // Nature. 1994. V. 367. P.614-621.
17. Vermaas W. Molecular-biological approaches to analyze photosystem 2 structure and function // Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 1993. V. 44. P. 457-481.
18. Твердислов В.А., Тихонов Н.А., Яковенко Л.В. Физические механизмы функционирования биологических мембран. М.: Изд-во Моск. Университета, 1987. 200 с.
19. Полякова И.Б. Медленная индукция флуоресценции листьев растений при разной фотосинтетической активности. Дисс. ... канд. физ.-мат. Наук. М.: МГУ, 2002. 148 с.
20. Horton P., Ruban A.V. Regulation of photosystem II // Photosynth. Res. 1992.V. 34. P. 375-385.
21. Kleima F.J., Hobe S., Calkoen F., Urbanus M.L., Peterman E.J.G., van Grondelle R., Harald P., van Amerongen H. Spectroscopic characterization of reconstituted LHClI which contains mainly Chl b and xanthophylls // Photosynthesis: Mechanisms and Effects / Ed. by Garab G. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Acad. Publ., 1998. V.I. P. 259-264.
22. Караваев В.А. Нелинейные регуляторные процессы в фотосинтезе высших растений. Дисс. ... докт. физ.-мат. Наук. М.: МГУ, 1990. 416 с.
23. Кукушкин А.К., Бадретдинов Д.З., Кузнецова С.А. Особенности применения флуоресцентных методов при низкой температуре в экологических исследованиях. Тезисы докладов Третьей всероссийской научной конференции “Физические проблемы экологии (Экологическая физика)”. М., 2001. С. 163-164.
24. Патин С.А. Влияние загрязнения на биологические ресурсы и продуктивность мирового океана. М.: Пищевая промышленность, 1979. 303 с.
25. Польшов В.А., Маторин Д.Н., Вавилин Д.В., Венедиктов П.С. Действие низких концентраций меди на фотоингибирование фотосистемы II у *Chlorella Vulgaris* (Beijer) / Физиология растений, 1993. Т. 40. №5. С. 754-759.
26. Saito, Y., Kurihara, K.-J., Takahashi, H., Kobayashi, F., Kawahara, T.; Nomura, A., Takeda, S. Remote Estimation of the Chlorophyll Concentration of Living Trees Using Laser-induced Fluorescence Imaging Lidar. Optical Review. 2002. Vol. 9, No 2. P. 37-39.
27. данные с сайта Protist Information Serevr <http://protist.i.hosei.ac.jp>

НЕКОТОРЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ИЗМЕНЧИВОСТИ  
КЛИМАТА

С.П. Перов<sup>1</sup>, К.В. Показеев<sup>2</sup>

(1) *Московский Государственный Университет Прикладной Биотехнологии*

(2) *Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова*

**Введение**

В [1-3] мы рассмотрели некоторые физические факторы глобальных изменений окружающей среды с изложением новых концептуальных подходов к двум главным и взаимосвязанным глобальным экологическим проблемам - эволюции озонового слоя и глобального потепления. Ниже приведены результаты дальнейшего развития этих подходов применительно к изменчивости климата.

**1. О когерентно-резонансных структурах**

В последнее время было установлено, что метеорологические и климатические процессы в атмосфере и океане и других геосферах (как открытых нелинейных системах) могут также определяться внешними гравитационными и термическими приливными воздействиями Солнца, Луны, планет [2,3], приводящими к нелинейному взаимодействию различного рода «осцилляторов». В результате в рассматриваемых средах формируются структуры с различными пространственно-временными масштабами. Осциллятором, характеризующим какую-либо геофизическую величину или параметр (например общее содержание озона (ОСО) или его тренд, или тренд температуры и др.), будем называть условно пространственно-временную структуру, характеризующуюся следующими свойствами:

1. резонансом под действием вынуждающей силы, т.е. увеличение рассматриваемого параметра по сравнению с соседними областями пространства и/или с соседними частотными интервалами;
2. дискретными или непрерывными уровнями энергии, импульса или момента импульса;
3. конечной шириной частотного интервала, минимальная величина которого определяется дискретностью исследуемого временного ряда, но может быть для удобства характеризован шириной частотного интервала, соответствующего нескольким или даже многим временным отрезкам, определяемого дискретностью ряда;
4. взаимодействием с другими осцилляторами путем передачи импульса, момента импульса или энергии.

Наиболее важной для климата является система астрономических осцилляторов - Солнце, Земля, Луна. При этом Солнце как осциллятор подвержено гравитационным воздействиям планет, влияющим на положение центра масс солнечной системы и приводящим к изменению его активности – весьма эффективному физическому фактору изменчивости климата в диапазоне от десятков до тысяч лет. На больших временах заметно меняется эксцентриситет и прецессия орбиты Земли, что приводит к хорошо известным ледниковым и межледниковым периодам в палеоклимате. Применительно к различным климатическим характеристикам гло-

бального и регионального масштабов (средняя температура поверхности, осадки, облачность, озоновый слой и др.) размеры осциллятора, очевидно, заключены в пределах от размеров (площади Земли) до нескольких десятков км. (в настоящее время технические возможности позволяют увидеть с орбиты такой осциллятор при наблюдении в надир). Хорошо известны осциллирующие крупномасштабные образования: центры действия атмосферы – квазистационарные субтропические антициклоны, муссонные системы, североатлантическое колебание, Эль-Ниньо (Ла Ниньо) – Южное колебание и др.

Характеристики таких осцилляторов можно представить в форме высотно-временных разрезов, спектрально-временных (СВАН) диаграмм, спектров мощности, вейвлет-спектров, различного рода периодограмм и Фурье-спектров и др. Как показывает анализ временных рядов наблюдений различных геофизических параметров в них всегда можно выделить ряд наиболее мощных (резонансных) периодов. Замечательной и типичной особенностью СВАН-диаграмм всех рассматриваемых параметров является временная изменчивость величин амплитуд и даже набора таких гармоник в определенные периоды. Последнее говорит о смене характеристического (квантованного) спектра колебаний под воздействием внешних факторов. Как будет показано смена квазистационарных режимов в геосферах Земли с определенными наборами спектров ряда геофизических параметров привела во второй половине 19 века к переходу всей климатической системы к новому режиму (с новыми наборами спектров) – режиму так называемого глобального потепления [3]. Начало потепления «совпало» с изменением характера колебаний солнечной активности.

**2. Скорость вращения Земли – геофизический и метеорологический индекс и фактор**

Одним из главных факторов и индикаторов изменчивости погоды и климата является переменный параметр – скорость вращения Земли, которая измеряется сейчас с очень высокой точностью [4,5]. Накопленный опыт работы с этим параметром показывает, что он является уникальным, созданным природой, интегральным индексом глобальных климатических изменений

Н.С.Сидоренковым [4,5] убедительно продемонстрирована важная роль лунно-солнечных гравитационных суточных и полусуточных приливов в метеорологических и климатических процессах в атмосфере и океане. Приливы, определяемым движением Луны, влияют на скорость вращения Земли. Индекс скорости вращения хорошо коррелирует с температурой планеты и формами атмосферной циркуляции в регионе от Гренландии до Енисея и к северу от 30 с.ш. [4]. При этом естественный синоптический период (термин введен синоптиками) в этом регионе в среднем меняется 4 раза в течение лунного месяца (27 дней), а смена синоптической ситуации синхронизована в пределах 1-2 дней с 4 экстремумами этого индекса – моментами перехода от ускорения к замедлению вращения Земли и наоборот (за 27 дней).

Спектр приземной температуры воздуха в Москве за 1960-2003 гг также ярко выявляет «лунные» максимумы: 27, 87 (27x3), 87(29x3), 205 (~29x7), 355 дней (~29x12 = 27x13 дней – лунный год! [5]).

При анализе долговременных (50 лет) глобальных характеристик озонового слоя была обнаружена их связь с этим индексом (внутригодовые гармоники, чанд-

леровский период, триплет квазидвухлетних гармоник), а также влияние изменения лунных и солнечных циклов (2,3). Особенно интригующими оказались связи глобального озона с периодом Чандлера (1,18 года), возникающего из-за наличия жидкого ядра Земли и колебаний орбиты Луны, которая «крутит» Землю вокруг трех различных осей: общей оси системы Земля-Луна (от центра Земли около 4500 км) с периодом 25-29 суток, оси прецессии с периодом 26 тыс. лет (причина – торможение приливами-отливами), оси нутации (колебания земной оси) с периодом 18,6 года. Кроме этого Луна и Земля имеют период изменения положения общего центра масс с периодом 8,85 года, так что расстояние Луна-Земля меняется в пределах 363,3-405,5 тыс. км. Узлы лунной орбиты непрерывно перемещаются по эклиптике к западу, совершая полный оборот за 18,61 г. Перигей же лунной орбиты движется к востоку, оборачиваясь за 8,85 г. В результате встречного движения совпадение узла с перигеем происходят ровно через 6 лет ( $1/18,61 + 1/8,85 = 1/6$ ). Если из частоты годового обращения Земли вычесть частоты движений узла и перигея Луны, то получится точная частота Чандлера ( $1/1,0 - (1/18,61 + 1/8,85) = 1/1,2$ ). Все эти гармоники с периодами 1,2, 6, 8,9 18,6 лет хорошо видны в спектрах глобального озона [2,3]. Также хорошо выделяются кратные чандлеровскому периоду в 4,8; 3,6; 2,4 лет индекса Эль-Ниньо/Южное колебание (ЭНЮК) - важнейшему климатическому параметру системы океан-атмосфера [4,5]. Главную и определяющую роль в атмосфере, как открытой системе, играют внешние по отношению к ней системы гравитационно взаимодействующих «осцилляторов» (Луна, Земля, Солнце, планеты) и гравитационные (в т.ч. термические для атмосферы Земли) приливные силы. Эти системы являются РАЗЕРАМИ (по аналогии с аббревиатурой ЛАЗЕР (LASER) RASER – Resonance Amplification Stimulated by External Radiation) [1]. Эти резонансы приводят к образованию квазипостоянных когерентно-резонансных структур различных пространственно-временных масштабов, надежно регистрируемых орбитальными наблюдениями озонового слоя. Аналогичные структуры в магнитных полях хорошо видны на Солнце – главном РАЗЕРЕ Солнечной системы.

Сильное изменение скорости вращения Земли произошло как раз в период перестройки климатической системы и катастрофического извержения Кракатау (1883 г). Эта особенность отчетливо проявилась и в спектре гармоник – свандиаграммах. В последние десятилетия и настоящее время длительность земных суток растет и это будет означать с некоторым сдвигом по времени (инерция) понижение температуры.

Потепление началось в середине 19 века путем перестройки всех геосфер под действием солнечной активности [3]. Для атмосферы Земли ключевым моментом явилось извержение вулкана Кракатау. Об этом свидетельствует появление серебристых облаков (80-85 км) через год после извержения. До этого эти облака не наблюдались. С 1884 г они наблюдаются в обоих полушариях каждый год. Этот факт говорит о том, что изменилась термодинамическая структура атмосферы (температура, циркуляция, химический состав) особенно мезосферы и стратосферы. Для появления ледяных частиц на высоте 80 км необходима низкая температура и наличие водяного пара, причем при забросе в стратосферу огромных количеств воды начинает усиливаться водородный каталитический цикл разрушения озона (особенно в мезосфере, где он является основным и определяющим тепловую функцию нагрева атмосферного воздуха).

Таким образом объясняется понижение температуры на высотах 80-85 км до величины необходимой для образования облаков. Изменились электрические характеристики и глобальная электрическая цепь, играющая важную роль в механизме солнечно-земных связей. Изменение циркуляционного режима привело к долговременным отрицательным трендам температуры в мезосфере. Максимальная величина тренда – около 1 градуса в год – наблюдается за последние 60 лет именно на высоте мезопаузы 80-85 км. В последние 10 лет этот тренд стал практически нулевым, что можно считать началом возвращения системы в исходное состояние.

### 3. О чем говорит спектрально-временная изменчивость феномена Эль-Ниньо-Южное колебание [3,4,5]

Спектр колебаний Эль-Ниньо – важный климатический параметр системы Земля – океан – атмосфера. С 1850 г. началось изменение характеристик океана – основного резервуара тепла в климатической системе. Спектр Эль-Ниньо - Южное колебание за 17-19 века был построен по данным анализа роста кораллов - чувствительных палеотермометров океанской воды, взятых из рифов на Галапагосских островах и атолле Тарава в Тихом океане. Резкое изменение спектрально-временных характеристик зафиксировано в конце 19 века, причем длиннопериодные гармоники (20 и более лет) вообще исчезают из спектра в 20 веке [3]. Это может свидетельствовать о проявлении стохастического резонанса в климатической системе, при котором в спектре красного шума энергия из самых низких частот перераспределяется между резонансными частотами системы. В период 1650-1750 гг в спектре Эль-Ниньо – Южное колебание выделяется 50-летняя (основная) гармоника и полоса гармоник, соответствующих интервалу периодов 3,6 – 6 лет; после этого характер спектра изменился и в 1750-1860 гг основным колебанием в низких частотах стала гармоника с периодом около 30 лет, хорошо выделяются также гармоники 3,6-4,6 года и полоса 7-15 лет; с середины 19 в (1850-60 гг) спектр опять резко изменился в сторону высоких частот (при общем спаде амплитуд только двух оставшихся 3,6- и полосы 4,8-6 - летних гармоник. В спектрах Эль-Ниньо – Южное колебание по данным анализа кораллов, в 20 веке (до 1975 г) отсутствуют какие либо гармоники с периодами больше 6 лет; (в спектрах Эль-Ниньо – Южное колебание они есть!

В 1997 году было зафиксировано самое мощное в 20 веке Эль-Ниньо 1997-98 гг, нарушившее глобальную циркуляцию и вызвавшее появление многочисленных мини- и макродыр в озоновом слое планеты (в т.ч. на экваторе) Это, по нашему мнению, и явилось сигналом очередной перестройки всей климатической системы. Температура планеты с тех пор не увеличивается, несмотря на продолжающийся рост концентрации углекислого газа в атмосфере! Через какой-то промежуток времени в спектре Эль-Ниньо - Южное колебание вновь должны были возникнуть долгопериодные (20 и более лет) колебания, что было характерно для «малого ледникового периода» (1400 – 1850 гг). И они появились! [3].

Современные модели феномена Эль-Ниньо - Южное колебание не учитывают гравитационные резонансы в системе океан – атмосфера. Присутствие в изменчивости последней циклов, кратных 18,6 и 1,2 г. указывает на то, что атмосфера и океан совершают вместе с Землей свободные и вынужденные



нутационные движения. Как отмечает Н.С.Сидоренков [4,5], взаимодействие атмосферы и океана порождает в них стохастические колебания, взаимодействующие с вынужденными лунно-солнечными приливами. Это приводит к перераспределению масс воды и воздуха по поверхности планеты, изменяет компоненты тензора инерции и по законам механики к возникновению свободной нутации или движению полюсов Земли. Некоторые супергармоники главного периода (18,6 г.) долгопериодных приливов и нутаций Земли (2,3; 3,7; 4,7; 6,2 г.) близки к субгармоникам периода Чандлера (2,4; 3,6; 4,8; 6,0 г.). Благодаря этому в системе Земля–океан–атмосфера возникает обычный (комбинационный) резонанс. Экваториальная зона как ловушка захватывает нутационные движения атмосферы и океана, и там они хорошо прослеживаются как многолетние волны. Кроме этого Сидоренков установил, что спектры индексов квазидвухлетней цикличности и координат полюса для периодов доминирующих гармоник подобны с коэффициентом 2. А это классический пример параметрического резонанса! Отметим, что индекс квазидвухлетней цикличности – один из важнейших климатических факторов, определяющий реакцию атмосферы на солнечные воздействия.

#### 4. Солнечная активность, галактические космические лучи, вулканизм, облачность и прозрачность атмосферы

В [3] нами было отмечено, что активность вулканов, поведение вулканического пылевого индекса и его связь с солнечными пятнами (среднее по 20 годам), начиная с 16 века были проанализированы и установлена антикорреляция солнечных пятен и аэрозольного вулканического индекса. Извержение вулкана Пинатубо (июнь 1991 г) самого мощного в 20-м столетии и ряда вулканов в первой декаде 21 века возможно свидетельствует о начале перестройки всей системы планет и Солнца, что должно привести к уменьшению солнечной активности [2] и увеличению вулканической активности, уменьшению прозрачности атмосферы, возрастанию потока галактических космических лучей, увеличению облачности и, в конечном итоге, к уменьшению поступающей на землю солнечной энергии.

Наиболее сложной проблемой в исследовании климата (включая моделирование) является облачность – факторы ее образования, обратные связи с циркуляционными процессами, термодинамическим режимом, переносом радиации и т.д. В недавней работе [9] был проведен достаточно детальный анализ многолетних спутниковых наблюдений нижней, средней и верхней облачности и установлена положительная корреляция вариаций космических лучей (определяемых солнечной активностью) с изменчивостью нижней облачности и отрицательная – средней и верхней. Был сделан вывод об отсутствии прямой физической связи облачность-космические лучи, а полученный результат авторы объяснили 11-летними вариациями солнечной постоянной (с удвоенной амплитудой около 0,07%!).

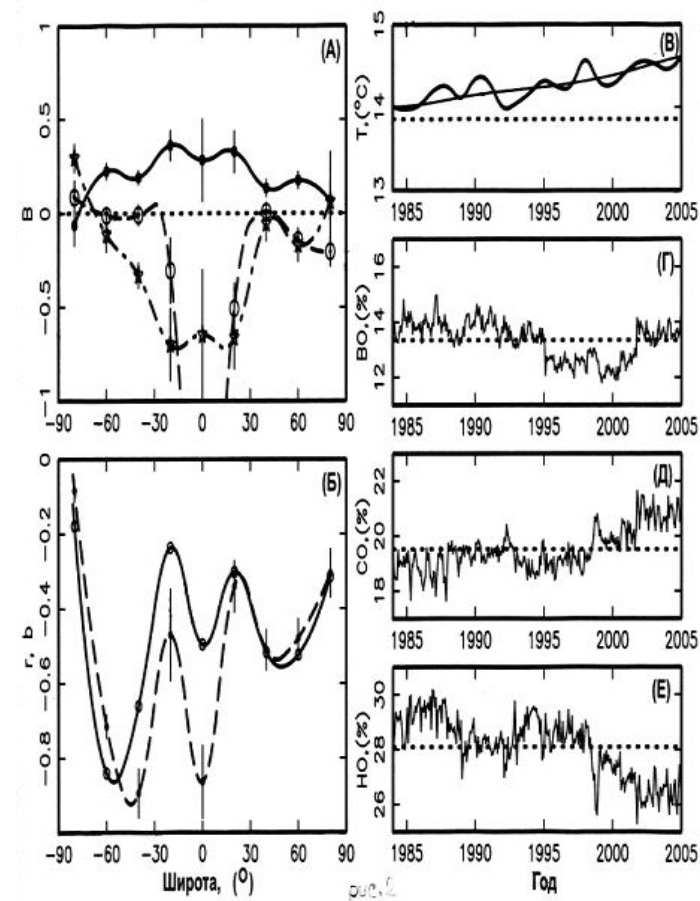


Рис.1. Временной ход поверхностной температуры (B), верхней облачности (Г), средней облачности (Д) и нижней облачности (Е). Пунктирные линии на рис.1B – средний уровень температуры в 20 столетии, на рис.1Г, Д, Е – средний уровень облачности за период измерений 1984 – 2005 г. (А) – широтная зависимость чувствительности верхней облачности (выше 6 км), средней облачности (3–6 км), нижней облачности (ниже 3 км), к вариациям галактических космических лучей (наклон  $b$  линии линейной регрессии). Сплошная линия – низкая облачность, прерывистая линия – средняя облачность, прерывистая линия с точками – верхняя облачность. Пунктирная линия – нулевой уровень при отсутствии чувствительности; (Б) – то же для чувствительности средней облачности к нижней облачности:  $b$  – сплошная линия и коэффициент корреляции  $r$  – прерывистая линия [9].



Однако широкое обсуждение проблем солнечно-земных связей и различных факторов «слабых» воздействий на среднюю и нижнюю атмосферу (в т.ч. на термодинамику атмосферы, облачность и осадки [1] дало однозначный вывод: при кратковременных активных событиях на солнце нижняя атмосфера меняет термобарический режим (до 10 градусов в тропосфере), что может ускорять образование облаков. При этом в «неустойчивых» зонах, (существующих наряду с когерентно-резонансными устойчивыми структурами), проявляется максимальная локальная неустойчивость и динамическая стохастичность и возможен резонанс под воздействием циклических процессов (осцилляторов). Существование таких структур в озоносфере подтверждается спутниковыми наблюдениями. При этом важную (а возможно и ключевую) роль играет энергетически насыщенная тропическая атмосфера, озоновый слой которой может воздействовать на глобальную циркуляцию (через ячейки Хедли) посредством так называемого «озонного» механизма солнечной активности, изменяющего условия распространения и отражения внутренних волн (короткопериодные гравитационные, приливные и планетарные экваториальные) с максимальными амплитудами в тропической зоне. Ход кривых на рис 1 с характерными двумя максимумами относительно экватора подтверждает это. Поясним, что солнечная активность и ультрафиолетовое излучение, воздействующее на озоносферу, находятся в противофазе с потоком космических (галактических) лучей, величина которого в тропиках практически не зависит от солнечной активности.

Лунно-солнечные приливы, по-видимому, в значительной степени влияют на характер представленных на рис.1. зависимостей поскольку они влияют на атмосферную циркуляцию и даже на осадки (см ниже).

### 5. Индийский муссон, скорость вращения Земли и другие факторы

Согласно Г.Я.Вангенгейму все многообразие форм атмосферной циркуляции в районе от Гренландии до Енисея и к северу от 30 с.ш. можно разделить на три типа: западную W (слабо возмущенный западно-восточный перенос, восточную E (гребень давления над европейской частью России и меридиональную C (ложбина над европейской частью России). Установлено, что частота появления формы C находится в противофазе с угловой скоростью вращения (корреляция +0,80). Существует также связь между многолетними флуктуациями вращения Земли и колебаниями глобальной температуры воздуха, региональных осадков и облачности и даже с изменениями уловов промысловых рыб в Тихом океане [4]. В работе [7] впервые установлена связь характеристик индийского муссона с вращением Земли в экваториально-тропической части океана, ограниченной с севера горными массивами Центральной Азии, к западу и востоку соответственно Африкой и Австралией (к югу) и Зондским архипелагом (к северу от экватора). По-видимому, существует одна причина изменения вращения Земли, муссона и других известных регрессоров-предикторов в регрессионных прогностических моделях климата как в глобальном, так и в региональном масштабах.

На рис.2 это показано в виде двух диаграмм: вверху изменчивость вращения Земли, циркуляции типа C, аномалий приземной температуры северного полушария [4]; внизу: характеристики суммарных осадков в Индии в период юго-западного летнего муссона за период 1895-1985 гг [6].

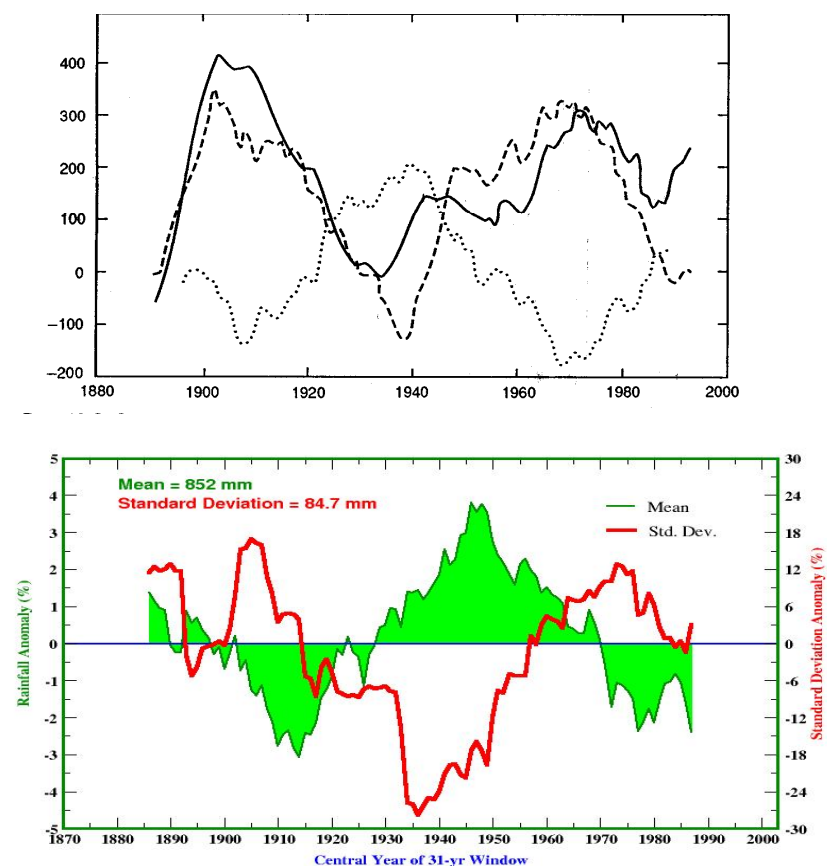


Рис.2. Синхронные изменения отклонений длительности земных суток от эталонных (сплошная кривая), интегральной кривой аномалий годового числа дней с процессами формы C (штриховая) с коэффициентом корреляции +0,80 и скользящих десятилетних аномалий температуры воздуха северного полушария (точечная кривая) за период 1891-1990 гг (вверху) [4]. Статистические характеристики суммарных осадков в Индии в период юго-западного летнего муссона за период 1895-1985 гг (внизу): верхняя кривая (с заливкой) – временной ход годовых отклонений в % (левая шкала) выпадения дождей от средней годовой величины за весь период (852 мм); нижняя кривая – временной ход величины стандартного отклонения также в % (правая шкала) от средней величины за рассматриваемый период (84,7 мм). На горизонтальной оси указаны годы, центрированные для временного интервала (сглаживающего окна) в 31 год [6].

Анализ данных в [6] показал, что с 1918 по 1970 гг (положительная аномалия осадков) произошло 9 событий Эль-Ниньо (4 засухи без Эль-Ниньо) и 6 Ла-Ниньо (5 наводнений). За весь период - 26 Эль-Ниньо (12 засух) при отрицательных отклонениях 18 Ла-Ниньо (11 наводнений). Из 26 событий Эль-Ниньо, совпадающих в подавляющем числе случаев с годами дефицита осадков, 4 события приходятся на годы с положительными отклонениями осадков от среднего. Из 18 Ла-Ниньо (11 наводнений без Ла-Ниньо) только один случай приходится на период дефицита. Таким образом количество Эль-Ниньо в 1,5 раза больше случаев Ла-Ниньо как за весь период 1870-2005 гг, так и за период 1918-1970 гг. Таким образом наблюдается корреляция периодов положительных и отрицательных отклонений муссонных осадков с периодами, соответственно, Ла-Ниньо и Эль-Ниньо. Однако выявление причинно-следственной связи муссона с климатическим явлением Эль-Ниньо-Южное колебание требует дополнительных исследований.

При анализе связи короткопериодных (дни, недели) вариаций скорости вращения Земли и выпадения муссонных дождей была установлена хорошая корреляция последних с экстремальными значениями скорости вращения Земли [8]. В этой работе показано, что характер выпадения осадков в Мумбае (Бомбее) в период май-октябрь 2000 г является квазипериодически структурированным по времени а начало периода осадков совпадает с экстремальными значениями скорости вращения Земли. Таким образом выпадение осадков, по-видимому, связано как и для района от Гренландии до Енисея со сменой естественного синоптического периода (по Вангейгейму) 4 раза в лунный месяц. в течение всего муссонного периода. Очевидно следует ожидать аналогичных закономерностей и в других регионах не только северного, но и южного полушария.

Для точного прогноза осадков необходимо возможно точнее учитывать источники водяного пара в системе муссона. Однако по мере достижения необходимого количества влаги в муссонной циркуляции срабатывает механизм приливных сил лунно-солнечной (в т.ч. и термической) природы, обусловленный также и особенностями данного года (Эль-Ниньо-Южное колебание, фаза квазидвухлетней цикличности, интенсивность ячеек Хэдли, Уокера и центров действия атмосферы) и периода муссона [7].

Возможным резонансным механизмом воздействия лунно-солнечных приливов на осадки может являться фазовый переход водяного пара с выделением тепловой энергии и с воздействием на сам прилив.

### Выводы

1. Спектры индексов квазидвухлетней цикличности экваториальной стратосферы и координат полюса для периодов доминирующих гармоник подобны с коэффициентом 2, что характеризует параметрический резонанс. Индекс квазидвухлетней цикличности – один из важнейших климатических факторов, определяющий реакцию атмосферы на солнечные воздействия. Анализ связи квазидвухлетней цикличности с периодами Эль-Ниньо-Южное колебание и с чандлеровским периодом показывают их кратность и взаимообусловленность. Анализ данных ракетного зондирования озоносферы (высотных профилей температуры и ветра) над станцией Тумба, Индия (8,5 с.ш.) в период 1969-1990 гг подтвердил существование чандлеровского периода на высотах 30-50 км и его связь с квазидвухлетней цикличности тропической атмосферы [11]. Таким образом установлена взаимная

связь двух генерирующих волновые процессы механизмов, локализованных в экваториальной стратосфере [4,5].

2. Стохастические колебания, взаимодействующие с приливами и вызывающие гравитационные резонансы в системе океан – атмосфера.(в т.ч. кратные 18,6 и 1,2 г.) указывают на то, что атмосфера и океан совершают вместе с Землей свободные и вынужденные нутационные движения (движения полюсов) [4,5]. Некоторые супергармоники главного периода (18,6 г.) долгопериодных приливов и нутаций Земли (2,3; 3,7; 4,7; 6,2 г.) близки к субгармоникам периода Чандлера (2,4; 3,6; 4,8; 6,0 г.). Благодаря этому в системе Земля – океан – атмосфера возникает обычный (комбинационный) резонанс. Экваториальная зона как ловушка захватывает нутационные движения атмосферы и океана, и там они хорошо прослеживаются как многолетние волны. Таким образом мы имеем дело со стохастическим и параметрическим резонансами в РАЗЕРЕ планеты Земля [1,10].

3. Определяющая роль солнечно-лунных приливов выявлена на примере такого важного климатического феномена как летний индийский юго-западный муссон [7,8].

Итак, рассмотрение закономерностей в рядах многочисленных метеорологических и климатологических, гео- и гелиофизических рядов наблюдений, а также анализ процессов в геосферах приводит к предварительному выводу о возможном начале очередной перестройки климатической системы за счет действия природных факторов и к изменению циркуляций в атмосфере и океане – началу глобального похолодания.

### Литература

1. С.П.Перов, К.В.Показеев. Физические основы глобальных изменений окружающей среды; в кн.: Современные глобальные изменения природной среды (климат и водный режим). т.2,- М., Научный мир, 2006 г., с. 708-737
2. Перов С.П., Показеев К.В., Вишератин К.В., Козлова Г.В. В XXI веке климат Земли будет холоднее, чем в XX (физические механизмы в системе атмосфера-Земля-космос)-Потоки и Структуры в Жидкостях: Физика Геосфер, сб. тезисов, часть 2.- Ин-т.проблем механики РАН; М.:2009.- с.159-162
3. Перов С.П., Показеев. Почему меняется климат Земли-2009. Потоки и Структуры в Жидкостях: Физика Геосфер, сб. тезисов, часть 2.- Ин-т.проблем механики РАН ; М.:2009.-с.159-162
4. Сидоренков Н.С. Физика нестабильностей вращения Земли. М.: Физматлит, 2002. 384 с.
5. Sidorenkov N.S. The Interaction Between Earth's Rotation and Geophysical Processes. -
6. K Rupa Kumar, G.B.Pant, G.Beig, G.Srivastavl. Climate Change Science: A Scoping Study for India. ИТМ, Pune. India. Nov. 2004
7. Перов С.П., Сидоренков Н.С. Климатические характеристики индийского муссона и скорость вращения Земли (возможность прогноза от года до декад). Конф-ция. МГУ посвящ. 90 летию М.А.Петросянца, сб. тезисов; МГУ им М.В.Ломоносова, окт. 2009.
8. Перов С.П., Сидоренков Н.С. Индийский муссон и скорость вращения Земли (возможность прогноза от дней до недель). Конф-ция. МГУ посвящ.

- 90 летию М.А.Петросянца, сб. тезисов; МГУ им М.В.Ломоносова, окт. 2009.
9. Вольфендейл А., Дялаи Д., Ерлыкин А.Д., Кудела К., Слоан Т. О природе корреляции между интенсивностью космических лучей и облачностью // Известия РАН, сер. Физ., т. 73, №3, март 2009. – с. 408-411
  10. Perov S.P., Subbaraya B.H., Offermann D., Chakravarty S.C. Okkam's Razor, Solar-Terrestrial Resonances and the Problem of Global Change // Int. Conf. "Fluxes and Structures in Fluids", Abstracts, Moscow, 2001, pp 164-166
  11. Nagpal D.P., Dhaka S.K and Shrivastav S.K. Wave characteristics in the troposphere and stratosphere over the Indian Tropics during the DYANA period. JATP, v.56, No9, 1994, pp1117-1133; i.10, No9, 1996, a. 1250-1254

УДК 577.32

PACS: 87.00.00, 87.15.-v, 87.83.+a

### ЭФФЕКТ КЛАСТЕРИЗАЦИИ В РАСТВОРАХ АЛЬБУМИНА И ГАММА-ГЛОБУЛИНА, СОДЕРЖАЩИХ ИОНЫ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ, ИЗУЧЕННЫЙ МЕТОДОМ ПОЛЯРИЗАЦИИ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ

Г.П. Петрова<sup>1</sup>, Ю.М. Петрусевич<sup>2</sup>, И.А. Сергеева<sup>1</sup>, С.Е. Сергеев<sup>1</sup>, В.В. Фадеев<sup>3</sup>,  
Е.А. Ширшин<sup>3</sup>

*1-кафедра молекулярной физики, 2-кафедра медицинской физики, 3- кафедра  
квантовой электроники*

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический  
факультет, кафедра молекулярной физики*

Методом поляризационной флуоресценции обнаружен эффект кластеризации основных белков сыворотки крови – сывороточного альбумина (БСА) и гамма-глобулина в водных растворах, содержащих ионы металлов:  $Pb^{2+}$ ,  $Cs^+$ ,  $Rb^+$  и  $K^+$ . Выявлено, что степень поляризации флуоресценции в растворах белков возрастает с ростом ионной силы, при этом время корреляции вращательной подвижности частиц (белковых кластеров) увеличивается, что свидетельствует о росте их массы.

*Ключевые слова:* альбумин, гамма-глобулин, поляризация флуоресценции, время корреляции вращательной подвижности, тяжелые металлы.

#### Введение

Изучение люминесцентных свойств вещества позволяет получать ценную информацию о различных физических и химических процессах в биологических средах. Макромолекулы белков, как и большинство органических соединений, являются флуорофорами. Это позволяет с успехом использовать метод флуоресценции для их исследования.

В настоящее время актуальной проблемой, обсуждаемой экологами и физиками, является наличие ионов тяжелых металлов в атмосфере Земли. Выбросы парниковых газов и загрязнение атмосферы продуктами переработки крупных заводов и предприятий негативно сказываются на глобальном климате и экологии

планеты. Флуоресцентный метод может быть с успехом использован для мониторинга состояния окружающей среды.

Исключительная чувствительность флуоресцентных методов позволяет очень точно определить долю содержания люминисцирующего вещества в биологических образцах. В данной работе, например, исследовались растворы с концентрациями компонент до  $10^{-8}$  М (моль/л), при общем объеме одной пробы около 3 мл. Это достоинство флуоресцентных методов способствует их применению и в области медицинской физики. В частности, флуоресцентные методы позволяют легко определить содержание в растворе крайне малых концентраций ионов тяжелых металлов.

В данной работе с помощью метода поляризации флуоресценции при возбуждении в ультрафиолетовом диапазоне длин волн исследовалось воздействие ионов свинца, цезия, рубидия и калия на молекулы бычьего сывороточного альбумина (БСА) и гамма-глобулина в водных растворах при изменении параметров среды (концентраций компонентов и pH).

#### 1. Метод поляризации флуоресценции

Как было показано Вавиловым, флуорофоры преимущественно поглощают те фотоны, у которых направление вектора электрического поля параллельно дипольному моменту поглощения. Поэтому при возбуждении поляризованным светом происходит селективное возбуждение только тех флуорофоров, которые частично ориентированы в направлении вектора поляризации падающего света.

Для каждого флуорофора направления дипольных моментов при поглощении и при испускании фиксированы, а угол  $\theta$  между ними определяет анизотропию флуоресценции  $r$ :

$$r = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + 2I_{\perp}} = \frac{3\cos^2\theta - 1}{2}. \quad (1)$$

Поляризация флуоресценции  $P$  связана с анизотропией формулой (2):

$$P = \frac{3r}{2 + r} \quad (2)$$

За время жизни возбужденного состояния флуорофора вращательная диффузия изменяет направление испускающего диполя, что уменьшает измеряемую анизотропию. Угол поворота за время жизни возбужденного состояния определяется температурой и вязкостью растворителя, объемом молекулы и длительностью возбужденного состояния. Согласно теории вращательной деполяризации люминесценции Левшина-Перрена [1,2] при поляризованном возбуждении справедливо следующее соотношение:

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{P_0} + \left( \frac{1}{P_0} - \frac{1}{3} \right) \frac{kT}{V\eta} \tau_{\phi\lambda} \quad (3)$$

В формуле (3) учитывается только вращательное движение молекул.

Если связать время корреляции вращательной диффузии  $\tau_{\phi\lambda}$  с молекулярными параметрами флуоресцирующего объекта (4), то можно получить зависимость (5).

$$\tau_{вр} = \frac{V\eta}{kT} = \frac{M\eta}{\rho kT} \quad (4)$$

$$\frac{1}{P} = \frac{1}{P_0} + \left( \frac{1}{P_0} - \frac{1}{3} \right) \frac{\tau_{фл}}{\tau_{вр}} \quad (5)$$

Здесь  $P$  — наблюдаемая степень поляризации;  $P_0$  — ее предельное значение в отсутствие деполаризации;  $V, M$  — объем и масса вращающейся молекулы;  $\rho$  — ее плотность;  $\tau_{фл}$  — время жизни возбужденного состояния;  $\tau_{вр}$  — время корреляции вращательной подвижности (переориентации) молекулы;  $k$  — константа Больцмана,  $\eta$  — вязкость раствора,  $T$  — абсолютная температура. Степень поляризации убывает с увеличением подвижности излучающей молекулы.

## 2. Методика эксперимента.

В работе были исследованы растворимые белки: бычий сывороточный альбумин и гамма-глобулин (препараты немецкой фирмы "Sigma-Aldrich"). Спектры флуоресценции изучаемых веществ измерялись с помощью фирменного спектрофлуориметра «HORIBA» FluoroMax-4.

Исследования белковых растворов проводилось в диапазоне длин волн возбуждающего света от 200 до 800 нм.

Приготовление исследуемых систем производилось в несколько этапов:

- приготовление растворителя (воды) с произвольным или заданным значением pH (при этом использовались предварительно полученные кривые зависимости pH растворов альбумина заданной концентрации от содержания в них кислоты или щелочи),

- приготовление раствора белка необходимой концентрации,
- приготовление раствора соли (ацетата свинца  $Pb(CH_3COO)_2$ , хлорида цезия CsCl, нитрата рубидия  $RbNO_3$ , хлорида калия KCl, хлорида натрия NaCl).
- приготовление конечных растворов путем смешивания растворов белка, соли и воды в нужных соотношениях.

Для изменения значений pH растворителя применялись слабые растворы кислоты HCl или щелочи KOH.

Значения ионной силы рассчитывались по формуле (6):

$$\mu = \frac{1}{2} \sum (z_i^+ n^c + z_i^- n^a), \quad (6)$$

где  $z_i$  и  $n$  — заряды и парциальные концентрации присутствующих в растворе катионов и анионов.

## 4. Основные результаты и обсуждение.

В наших ранних работах [3,4] были исследованы спектры флуоресценции БСА, содержащих соли NaCl и KCl. Оказалось, что наличие в растворах ионов  $Na^+$  не приводит к значительным изменениям интенсивности в спектре флуоресценции альбумина, в то время, как наличие ионов  $K^+$  вызывает уменьшение величины интенсивности флуоресценции. Это, вероятно, связано с тем, что ионы калия прочно связываются с отрицательными группами на поверхности белка и характер взаи-

модействия макромолекул меняется, что приводит к образованию белковых кластеров.

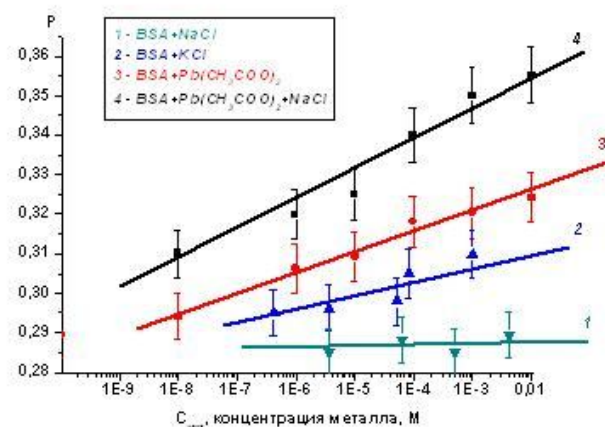


Рис. 1. Зависимость степени поляризации от концентрации ионов натрия (1), калия (2), свинца (3), натрия и свинца (4) в водных растворах БСА.

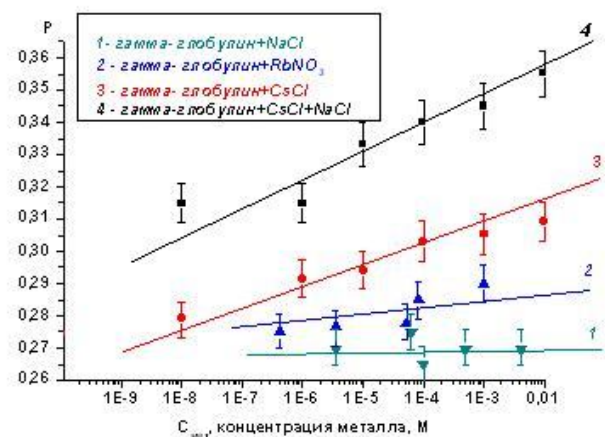


Рис. 2. Зависимость степени поляризации флуоресценции от концентрации ионов натрия (1), рубидия (2), цезия (3), натрия и цезия (4) в водных растворах гамма – глобулина.

В данной работе было получено, что в водных растворах БСА и гамма-глобулина степень поляризации  $P$  не меняется при добавлении ионов  $Na^+$  (рис.1,2-кривая 1) и увеличивается при добавлении ионов металлов  $Pb^{2+}$ ,  $Cs^+$ ,  $Rb^+$  и  $K^+$  (рис.1,2-кривые 2,3,4), что свидетельствует об изменениях динамических свойств



макромолекул белков - времени корреляции вращательной подвижности (рис.3,4) и, следовательно, массы частиц (формула 4) (рис.5,6). Все исследования проводились в области изоэлектрических точек сывороточного альбумина (pH 4,9) и гамма-глобулина (pH 6,0)

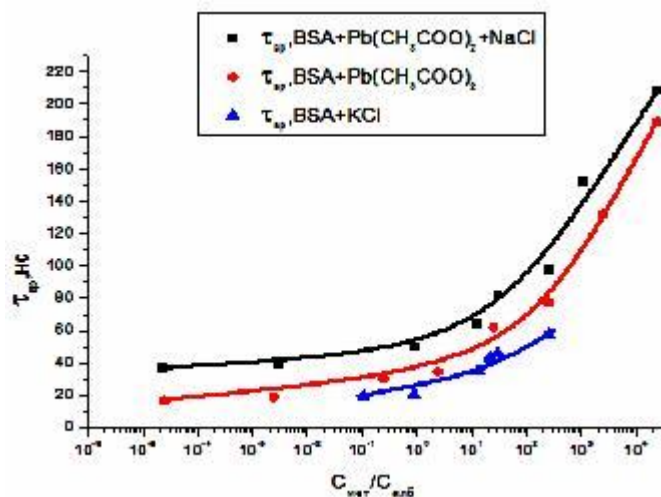


Рис. 3. Зависимость времени корреляции вращательной подвижности молекул БСА от относительной концентрации молекул белка и ионов калия (1), свинца (2), свинца и натрия (3) в водных растворах.

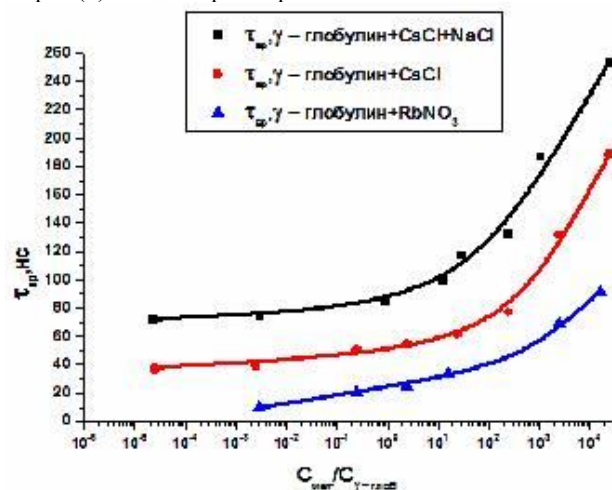


Рис. 4. Зависимость времени корреляции вращательной подвижности молекул гамма-глобулина от относительной концентрации молекул белка и ионов рубидия (1), цезия (2), натрия и цезия (3) в водных растворах.

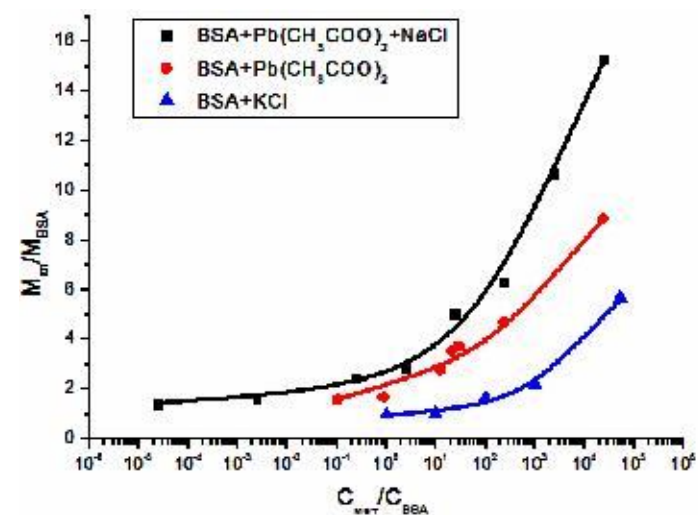


Рис. 5. Расчетные значения относительной массы белковых кластеров в растворах БСА, содержащих ионы калия (1), свинца (2), свинца и натрия (3) в зависимости от относительной концентрации ионов металла и молекул белка.

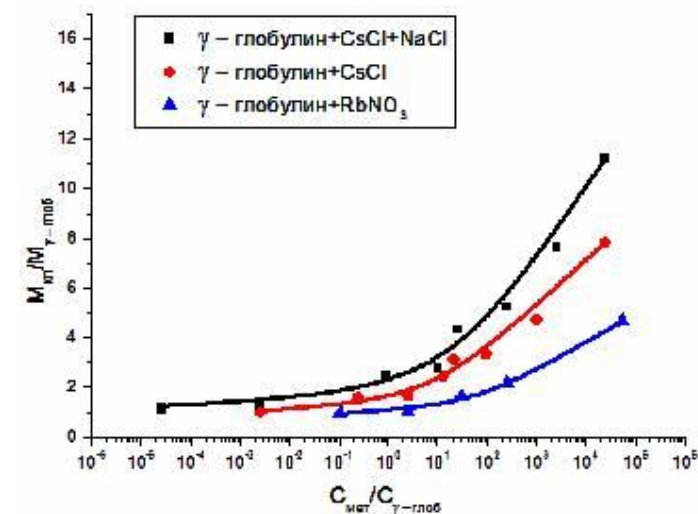


Рис. 6. Расчетные значения относительной массы белковых кластеров в растворах гамма-глобулина, содержащих ионы рубидия (1), цезия (2), натрия и цезия (3) в зависимости от относительной концентрации ионов металла и молекул белка.

Из данных по поляризации флуоресценции были рассчитаны значения времен вращательной подвижности по формулам (4,5). Максимальный рост времени вра-

щательной подвижности наблюдается при добавлении ионов натрия в концентрациях соответствующих физиологическим значениям в водные растворы БСА и гамма-глобулина, содержащих ионы тяжелых металлов свинца и цезия (рис.1,2-кривая 4). В данном случае ионы натрия усиливают эффект кластеризации белковых молекул, что приводит к увеличению времени корреляции вращательной подвижности (рис.3,4-кривая 3) и масс (рис.5,6-кривая 3).

Полученные результаты показывают, что метод поляризации флуоресценции может служить для определения наличия тяжелых металлов в растворах различных биологических жидкостей, например сыворотки крови или лимфы.

#### Заключение

- Степень поляризации флуоресценции в водных растворах бычьего сывороточного альбумина и гамма-глобулина, содержащих ионы металлов  $Pb^{2+}$ ,  $Cs^+$ ,  $Rb^+$  и  $K^+$ , возрастает с ростом их концентрации. При этом возрастает время корреляции вращательной подвижности частиц, что свидетельствует о росте их массы.
- Времена корреляции вращательной подвижности частиц в растворах альбумина и гамма - глобулина существенно возрастают при увеличении ионной силы растворов, содержащих указанные ионы. Это явление можно объяснить образованием наночастиц – белковых кластеров.
- Из полученных результатов можно сделать вывод, что воздействие на белок ионов калия аналогично воздействию ионов токсичного металла свинца.
- Добавление в водные растворы альбумина и гамма - глобулина, содержащих соли свинца и цезия (с концентрациями лежащими в области ПДК), соли NaCl (с концентрацией близкой к физиологическому значению) приводит к усилению «эффекта кластеризации».

#### Литература

1. Дж.Лакович. Основы флуоресцентной спектроскопии. – М, 1986.
2. Л.В.Левшин, А.М.Салецкий. Оптические методы исследования молекулярных систем.
3. Петрова Г.П., Сокол Н.В. // Вестн. МГУ, сер. Физ. Астр., 2007, № 1, с. 63-65
4. Сергеева И.А, Сокол Н.В., Иванова М.С. и др. // Вестн. МГУ, сер. Физ. Астр., 2009, № 4, с. 85-89.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 09-02-00438-А.

### ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ МАЛЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ТОКСИЧЕСКИХ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА РАСТВОРЫ БЕЛКОВ И ФЕРМЕНТОВ

Ю.М. Петрусевич, Г.П. Петрова, Е.А. Папиш

Известно, что по химическому составу человек почти на 90% состоит из воды, остальное это органические соединения и металлы.

Как много металлов в тканях и биологических жидкостях, таких как кровь и лимфа, и какова их роль известна уже давно. Так железо является составной частью клеток - эритроцитов переносящих кислород и выводящих углекислоту.

В организме человека основными являются щелочные металлы, такие как натрий, калий и кальций. При среднем весе человека около 70 кг, около 2 кг приходится на щелочные металлы, и прежде всего кальций, который определяет основной состав костной ткани, тогда как натрий и калий входят в состав клеток, а также находятся в крови и лимфе. Электрическая активность нервных волокон также определяется наличием и движением щелочных металлов.

Другая группа металлов с молекулярным весом более 40 условно называется тяжелыми металлами. В теле человека суммарная концентрация тяжелых металлов не превышает 8 грамм. При этом 7 грамм приходится на железо, которое связано с белком крови гемоглобином, ответственным за снабжение всех клеток кислородом. Другие тяжелые металлы, такие как медь, марганец, кобальт, цинк и другие входят в состав биологических катализаторов - ферментов, которые осуществляют большинство химических реакций в клетках и тканях.

В результате активного воздействия цивилизации на окружающую среду степень ее загрязнения возрастает с каждым годом. Главной причиной ухудшения экологической обстановки можно считать колоссальное потребление и переработку минеральных ресурсов, являющихся источником металлов, необходимых производствам. Особенно опасным является все возрастающее загрязнение природных источников воды токсичными веществами, включая ионы тяжелых металлов.

Поскольку человек за год выпивает около двух тонн питьевой воды, то даже малые концентрации токсичных тяжелых металлов, которые накапливаются в организме человека, могут привести к тяжелым заболеваниям, включающим онкологические и сердечно - сосудистые.

В условиях активной антропогенной деятельности загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами стало особенно опасным потому, что не существует надежных механизмов самоочищения природной среды. Так период выведения из почвы цинка составляет около 500 лет, а свинца несколько тысяч лет. Главными источниками атмосферного загрязнения тяжелыми металлами являются предприятия теплоэнергетики, так как в угле и нефти содержатся практически все тяжелые металлы. При этом количество соединений ртути, кадмия, кобальта в атмосферных выбросах при сжигании угля, нефти, торфа может в несколько раз превышать количество указанных металлов, получаемых обычным промышленным способом.

Кроме того к основным источникам токсических загрязнений следует отнести автотранспорт. Автомобили кроме оксида азота, окиси углерода и серы выбрасывают в атмосферу соли свинца. Установлено, что у жителей США этот металл в организме приближается к ПДК -предельно допустимому значению равному 0.1 мг на кг веса. Из тяжелых металлов наиболее токсичными являются бериллий-ПДК=0.0002 мг/л, висмут-ПДК-0.01 мг/л, ртуть-ПДК-0.005 мг/л.

Физический механизм отравляющего действия тяжелых металлов на организм человека был неизвестен. До недавнего времени было непонятно, почему сравнительно малые концентрации тяжелых металлов вызывают тяжелые отравления. Последние годы в работах, проводимых на физическом факультете, нами было обнаружено новое физическое явление - образование наноразмерных дипольных белковых и ферментных кластеров в растворах содержащих ионы тяжелых металлов, таких как цезий, рубидий, медь, кадмий, свинец, европий и другие.

Образование наноразмерных частиц было доказано такими современными методами как лазерное светорассеяние, корреляция фотонов, поляризованная флуоресценция и ЭПР спектроскопия.

Белковые макромолекулы и макромолекулы ферментов в водных растворах имеют значительный поверхностный заряд и обладают аномально большим дипольным моментом. Электрический заряд макромолекул не позволяет им сблизиться благодаря силам кулоновского отталкивания. Присутствие в растворе ионов легких металлов, таких как  $\text{Na}^+$ , не может компенсировать заряд макромолекул, так как ионы натрия прочно удерживают гидратную воду. В случае ионов тяжелых металлов, таких как Pb, Hg, Cs и других, имеющих большой кристаллический радиус, и у которых гидратированная вода не может удерживаться вблизи иона при его сорбции на макромолекуле, происходит полная компенсация поверхностного заряда макромолекулы. При этом происходит взаимное притяжение макромолекул по механизму диполь-дипольного взаимодействия. Это приводит к образованию дипольных наноразмерных кластеров, которые наблюдаются на картинках получаемых методом силовой микроскопии.

### Литература

1. Л.А.Николаев, Металлы в живых организмах. М.1986 г.
2. Д.Уильямс, Металлы жизни М., Мир. 1975 г.
3. Петрова Г.П., Петрусевич Ю.М., Тен Д.И., Образование дипольных комплексов в растворах белков с малой концентрацией тяжелых металлов: диагностика методом лазерного светорассеяния. Квантовая электроника. 2002 г. Т.32, № 10. С.1-5.

Работа выполнена при финансовой поддержки гранта РФФИ 09-02-00438-А.

## СИСТЕМЫ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ И ПОМЕ- ЩЕНИЙ В РАДИОЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ

А.А. Потапов

*Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова*

Исследования электромагнитных полей радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ) как фактора окружающей среды в условиях обитаемых сред нередко ограничиваются анализом пространственного распределения поля на расстоянии до 20...30 м от их источников, где структура поля полностью определяется диаграммой направленности антенн или составлением сводных таблиц со средними и максимальными значениями поля по отдельным участкам обследованной территории [1], т.е. без проведения анализа пространственного распределения поля. Средние значения напряженности ЭМП РЧ базовых станций (БС) сотовой связи по данным [1] составляют 0,82 В/м (максимальные 1,19 В/м) для селитебных территорий города на высоте 2 м от земли и 0,93 В/м (максимальные 1,87 В/м) вблизи первого ряда зданий вокруг БС.

В зарубежной практике анализ пространственного распределения поля, получил более широкое распространение. В [2] с использованием измерительного комплекса автомобильного базирования было выявлено, что напряженность электрического поля в полосе частот 0,1...3 ГГц вдоль автотрасс составляла от 0,4...1 В/м до 3...6 В/м на удалении до 200...300 м от БС и до 3...5 В/м (в отдельных точках до 20 В/м) на расстояниях до 100 м от БС.

В случае пешеходной съемки (на высоте 1,7 м от земли), проведенной в [3], пространственное разрешение экологического мониторинга составляет от 50...60 м и более, преимущественно в условиях прямой видимости антенн БС. В этом случае напряженность поля в полосе частот 0,1...3 ГГц составляла от 0,19...0,6 В/м до 1,9...2,5 В/м; максимальные уровни поля фиксировались как вблизи, так и на удалении до 150...200 м от БС, в зависимости от условий видимости.

Исследования электромагнитных полей радиочастотного диапазона в условиях жилых и общественных помещений обычно ведутся с помощью носимых персональных датчиков-регистраторов уровней ЭМП РЧ [4-5]. По данным [4] в среднем интегральная напряженность ЭМП РЧ в диапазоне 88 МГц...2,5 ГГц (по наиболее значимым участкам спектра: FM, GSM 900, GSM 1800, UMTS и др.) по месту жительства составила 0,19 В/м, при этом на полосы частот излучения базовых станций сотовой связи (downlink range) приходилось около половины (46,2 %) от суммарной плотности потока энергии.

Аналогичная величина по материалам [5] составила 0,20 В/м, при этом на долю сотовой связи диапазона downlink приходилось 23 %, а на внутренние источники (DECT, Wi-Fi, излучения мобильных телефонов) 52 % от суммарной плотности потока энергии. Максимальные значения ЭМП РЧ в среднем по жилищу составили от 0,7 В/м [4] до 1,5 В/м [5]. Приведенные величины рассчитаны по тем измерени-

ям, которые превышали порог чувствительности прибора (0,05 В/м), при этом их доля относительно общего числа измерений была невелика (от 3...5 до 15 % в [5]).

Средние значения напряженности ЭМП РЧ за счет излучения базовых станций (БС) сотовой связи по данным российских исследователей составили 0,8 В/м (макс. до 1,6 В/м) для помещений, расположенных на последнем этаже зданий с излучающими антеннами на крыше и 0,9 В/м (макс. до 1,9 В/м) вблизи зданий, ближайших к месту установки антенн [1].

Из-за сложной трехмерной структуры застройки расстояние от БС не является определяющим фактором электромагнитной безопасности: повышенные уровни ЭМП РЧ располагаются на расстояниях 100...300 м от антенн в местах проекции на поверхность земли (стены зданий) основного лепестка диаграммы направленности, а внутри помещений, расположенных практически на одинаковых расстояниях от БС, напряженность электромагнитного поля может варьироваться десятки раз: от 0,02 до 0,6 В/м при расстояниях от антенн до 50 м и от 0,06 до 0,5 В/м при расстояниях до 150 м [6]. Экранирующая способность ограждающих конструкций помещений может варьироваться в десятки раз, а внутри помещений могут отмечаться локальные (в пределах 1 м<sup>3</sup>) вариации поля амплитудой до двух порядков величины [7].

Установленная санитарными нормами методика измерений не адаптирована к столь высокой изменчивости поля и предполагает для открытых пространств экспериментальное уточнение преимущественно границ санитарно-защитных зон радиопередающих объектов, а в помещениях проведение обыкновенно не более 10...12 замеров на комнату (в центре, у окон, у батарей отопления); высота измерений принимается равной 0,5, 1,0 и 1,7 м от пола, за результат принимается наибольшее из измеренных значений [8], но на практике точечные измерения не всегда объективно характеризуют экологическую обстановку [7].

В качестве средств объективного контроля условий электромагнитной безопасности обычно применяются широкополосные частотно-неселективные измерители ЭМП РЧ, обладающие такими недостатками как: высокий нижний порог чувствительности (> 0,5 В/м) и невозможность проведения частотной декомпозиции структуры электромагнитного загрязнения, но снижающие время- и трудоемкость натуральных изысканий и требования к подготовке персонала по сравнению с радиотехническими контрольно-измерительными комплексами [9].

В таких условиях возможным компромиссом между оперативностью, сложностью и степенью детализации исследования может служить совершенствование методологии проведения широкополосных частотно-неселективных измерений и методов обработки их данных, которое позволит решать следующие задачи [10]:

1. Выявлять, визуализировать и проводить проблемно-ориентированный анализ пространственной неоднородности ЭМП РЧ в пределах территорий/помещений

2. Получать обобщенные характеристики, в том числе энергетические, параметров электромагнитной безопасности

3. Идентифицировать основные пути проникновения ЭМП РЧ внутрь помещений и оценивать их энергетическую эффективность

Очевидным способом решения первой задачи по выявлению, визуализации и анализу пространственной неоднородности ЭМП РЧ является увеличение пространственного разрешения экологического мониторинга одновременно с создани-

ем условий проведения пространственно-ориентированного анализа экспериментальных данных. Последнее обеспечивается созданием метрически-корректной цифровой модели обследуемого объекта и интеграции в нее данных натуральных измерений в среде систем геопространственного моделирования одной из наиболее функциональных разновидностей которых являются геоинформационные системы (ГИС).

Для практической апробации предлагаемых подходов автором был проведен высокодетализированный экологический мониторинг ЭМП РЧ участка территории МГУ им. М.В. Ломоносова в пределах которого имеется 6 мест установки антенн сотовой связи и еще 13 вне его на расстоянии до 1 км. Площадь обследованной территории составляет 0,51 км<sup>2</sup>. Измерения напряженности переменного электрического поля ( $E$ , В/м) проводились с помощью высокочувствительного широкополосного измерителя TES-92 (Актаком АТТ-2592). Прибор оснащен изотропной антенной, обеспечивающей измерение полного вектора электромагнитного поля; рабочий диапазон частот 50 МГц...3,5 ГГц, диапазон измерений по напряженности поля 0,02...11 В/м, паспортная погрешность < 2,4 дБ.

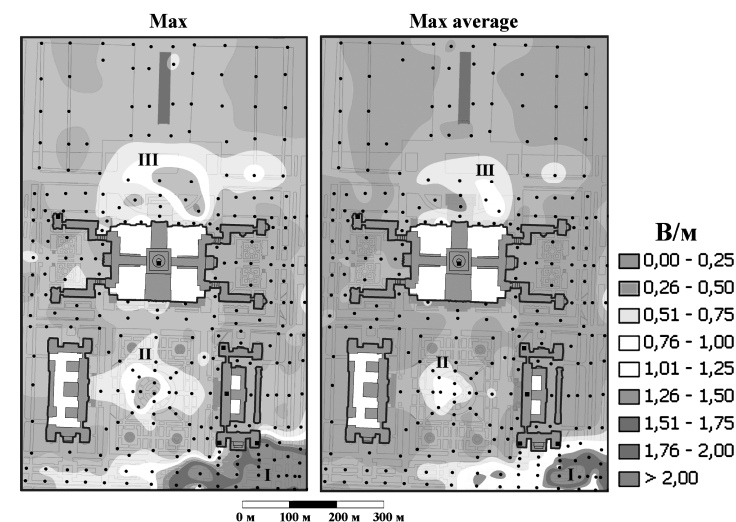


Рис. 1. Пространственное распределение величины  $E$  (в В/м) по обследованной территории; БС сотовой связи показаны квадратами; точки – пункты измерения.

Были проведены измерения в 266 точках на территории искомого участка на высоте 1,6...1,7 м от земли со средним пространственным разрешением 30,8 м. Использовалась следующая методика: в каждой точке проводилось 3 измерения в режиме фиксации максимальных уровней поля (режим Max) и 3 измерения максимальных уровней поля с осреднением (режим Max average) длительностью 20...30 секунд каждое, т.е. всего 6 измерений в каждой точке. После каждой пары измерений (Max и Max average) антенна измерительного прибора смещалась в плане на



случайную величину в диапазоне 20...30 см для минимизации влияния интерференционных эффектов. При обработке данных для каждого пункта измерений вычислялись средние значения  $Max$  и  $Max\ average$ . Измерения в режиме  $Max$  позволяют оценить максимальную величину поля, формирующуюся за счет многолучевого распространения радиоволн, подверженного ряду случайных вариаций; эта величина позволяет охарактеризовать потенциальную величину электромагнитной опасности в данной точке. Измерения в режиме  $Max\ average$  характеризуют величину поля с осреднением по времени, т.е. более стабильную составляющую электромагнитного загрязнения.

На основе сети из 266 измерений в среде геоинформационной системы ArcGIS методом сплайн интерполяции с барьерами (Spline with barriers) были созданы растровые Grid-матрицы с размером пикселя 1x1 м, отображающие пространственное распределения напряженности поля в обоих режимах измерения (рис. 1). В качестве барьеров интерполяции были использованы контура домов и границы обособленных участков вблизи них (общей площадью 0,07 км<sup>2</sup>) где измерения не проводились и, соответственно, они были исключены из процесса интерполяции.

В соответствии с санитарными нормативами [8] для селитебных территорий для диапазона 0,3...300 ГГц установлен предельно-допустимый уровень (ПДУ) ЭМП РЧ равный 3,4 В/м. Превышение ПДУ в пределах обследованного района было обнаружено только в двух точках в режиме  $Max$  (3,7 и 4,6 В/м соответственно), поэтому электромагнитная обстановка в целом соответствует принятым критериям безопасности. По абсолютным значениям полученные результаты близки к опубликованным в [1] и совпадают по диапазону вариаций с [2–6]; максимальный перепад напряженности ЭМП РЧ в пределах обследованного микрорайона составил около 48 дБ для обоих режимов измерений.

На территории можно выделить 3 зоны (№№ I...III, рис. 1) с повышенными уровнями ЭМП РЧ (>0,5 В/м). Визуальный анализ на местности показал, что все они располагались в местах видимости секторных антенн БС, с ориентацией в сторону наблюдателя. Протяженность этих зон по отдельным направлениям составляла: от 130...200 м до 400...550 м по результатам измерений в режиме  $Max$  и от 100...150 до 200...400 м в режиме  $Max\ average$ . Общая площадь этих зон составила 0,13 км<sup>2</sup> (25,4 % общей площади) и 0,06 км<sup>2</sup> (11,8 % общей площади) соответственно. Наиболее высокие уровни ЭМП РЧ были зафиксированы в зоне I в условиях одновременной видимости 3 БС.

В условиях сформировавшейся электромагнитной волны (более 5...10 длин волн от источника излучения) между напряженностью поля ( $E$ , В/м) и плотностью потока энергии ( $S$ , Вт/м<sup>2</sup>) существует неизменное соотношение (1):

$$S = \frac{E^2}{377} \quad (1)$$

Соотношение (1) при проведении частотно-неселективных широкополосных измерений позволяет получить обобщенные энергетические параметры электромагнитного загрязнения территорий. Для этого с помощью (1) для каждой точки измерения рассчитывается плотность потока энергии  $S_i$ , Вт/м<sup>2</sup>; затем на основе полученных значений в среде ArcGIS с использованием ранее указанного алгоритма интерполируется растровая Grid-матрица с размером пикселя 1x1 м.

В большинстве случаев основной поток электромагнитного излучения от радиопередающих объектов направлен под небольшим углом к поверхности земли, поэтому величина  $S_i$ , определенная на основе приземных измерений (высота 1,6...1,7 м), характеризует общее количество энергии, поступающей на поверхность земли. Доля отраженной энергии определяется коэффициентом отражения, зависящим от угла падения, поляризации и типа подстилающей поверхности – т.е. в общем случае трудно детерминируемых величин. Поэтому  $Q$  – **интегральная энергетическая нагрузка территории**, рассчитываемая для заданной территории на основе значений  $S_i$  (2), есть оценка предела суммарной энергетической нагрузки на территорию при наиболее благоприятных для поглощения радиоволн условиях:

$$Q = A \cdot \sum_{i=1}^n S_i, \quad (2)$$

где  $S_i$  – значение  $i$ -го пикселя растровой поверхности, Вт/м<sup>2</sup>;  $A$  – площадь пикселя, м<sup>2</sup>. Системой ArcGIS определяется сумма значений пикселей растровой поверхности, что обеспечивает автоматизированный расчет величины  $Q$ .

Расчет с помощью (2) показал: суммарная пиковая энергетическая экспозиция обследованной территории составила 564,3 Вт (режим  $Max$ ), а пиковая с осреднением 229,1 Вт (режим  $Max\ average$ ), что в расчете на квадратный километр составляет 1106,5 и 449,2 Вт/км<sup>2</sup> соответственно, т.е. для крупных городов и населенных пунктов с развитой радиотехнической инфраструктурой общая суммарная энергетическая нагрузка территорий может достигать десятков киловатт, что сопоставимо с мощностью промышленных радиовещательных установок.

Эффективное применение геоинформационных систем возможно и при экологическом мониторинге ЭМП РЧ в условиях помещений. Практическая апробация была выполнена автором на примере четырех учебных/лабораторных аудиторий, расположенных в зданиях МГУ им. М.В. Ломоносова. Три из них находились на высоте 17-го этажа ( $\approx 70$  м от земли) и из окон каждого имелась прямая видимость большого количества радиопередающих объектов: вещательного центра FM диапазона и порядка 7...10 базовых станций сотовой связи. Четвертое помещение было расположено на высоте 3-го этажа в зоне прямой видимости 3 базовых станций сотовой связи.

Для всех четырех помещений в среде геоинформационной системы ArcGIS на основе поэтажных планов, уточненных натурными измерениями, были созданы метрически корректные (точность  $\pm 5...7$  см) цифровые модели помещений, включающие капитальные стены, перекрытия, перегородки, оконные и дверные проемы. Измерения напряженности ЭМП РЧ велись с помощью ранее указанного измерительного прибора по аналогичной методике. Замеры проводились на высоте 2 м от пола (1/2 высоты помещения); данная высота была выбрана т.к. вертикальное профилирование показало, что наиболее высокие значения поля фиксируются именно на этой высоте, а вблизи пола и потолка напряженность поля снижается на 10...15 и более децибел. Во время измерений в обследованных помещениях и смежных с ними отсутствовали радиопередающие устройства, т.е. оценивалось поле внешних по отношению к помещению излучателей.

Для пространственного анализа вариаций поля в среде ArcGIS на основе точечных слоев, в атрибуты которых были интегрированы результаты измерений, с помощью сплайн-интерполяции строго в границах помещений были построены

непрерывные растровые Grid-матрицы (размер пикселя 5x5 см), что позволило перейти от набора дискретных значений к непрерывному распределению поля по результатам измерений в режимах Max и Max average как в линейной (в единицах напряженности поля В/м и плотности потока энергии Вт/м<sup>2</sup>), так и в логарифмической (единицы дБ(мкВ/м)) мере. На рис. 2А приведен пример пространственного распределения поля для одной из аудиторий.

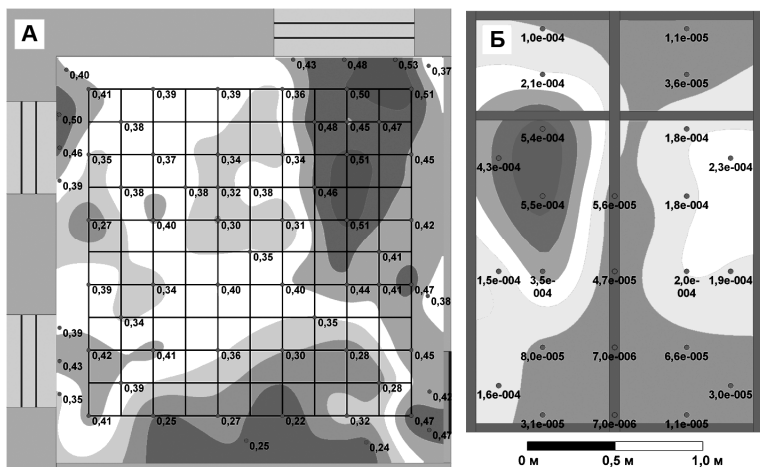


Рис. 2. А – распределение ЭМП РЧ в одной из аудиторий (Max в В/м, тоновая градация соответствует шагу в 0,05 В/м; шаг сетки 0,5 м); Б – пространственное распределение плотности потока энергии (в Вт/м<sup>2</sup>) в плоскости оконного проема; шаг тоновой градации 0,001 Вт/м<sup>2</sup>.

В соответствии с санитарными нормативами [8], действующими на территории г. Москвы, для жилых помещений установлен следующий ПДУ ЭМП РЧ: 2,7 В/м для диапазона 0,3...300 ГГц. Средние значения напряженности поля по измерениям в режиме Max во всех аудиториях были ниже ПДУ в 6,9...15,9 раз, а максимальные значения в 3,5...7,1 раза; в режиме Max average полученные величины были еще ниже, поэтому электромагнитная обстановка удовлетворяла принятым критериям безопасности. Вместе с тем, в пределах каждого помещения выявлена значительная пространственная неоднородность ЭМП РЧ с перепадами варьировавшимися от 7,7 до 39,4 дБ. Характерная протяженность зон с колебаниями поля менее 5 дБ в аудиториях составляла от 0,5...1,5 м до 2,5...3 м.

При проникновении электромагнитного излучения в помещение сквозь оконный проем в рассматриваемом диапазоне частот (0,05...3,5 ГГц) практически вся энергия электромагнитных волн поглощается стенами, перекрытиями и предметами интерьера при многократных отражениях/дифракциях многолучевого радиосигнала; потери в воздухе незначимы. Таким образом, при наличии цифровой растровой модели плоскостного распределения плотности потока энергии по всей площади помещения, удовлетворяющего следующим требованиям: полнота охвата помещения, использование результатов натурных измерений, интегрированность в

модель помещения, метричность параметров (размер пикселя, единицы измерения), возможен расчет обобщенного энергетического показателя – **энергетической экспозиции помещения** ( $Q_{\Pi}$ , дБ(мВт)), т.е. величины общей поглощаемой мощностью ЭМП РЧ, равной потоку электромагнитного поля сквозь искомую поверхность.

Алгоритм расчета величины  $Q_{\Pi}$  на основе метрически-корректной и пространственно-привязанной растровой поверхности будет аналогичен (2) и по сути представляет расчет поверхностного интеграла первого рода при заданных значениях искомой функции в каждой точке (значение пикселя) и конечном шаге дискретизации искомой поверхности (размер пикселя). Для удобства дальнейших расчетов запишем (2) в логарифмическом представлении:

$$Q_{\Pi} = 10 \text{Log} \left( 10^3 \cdot A \cdot \sum_{i=1}^n N_i \right), \quad (3)$$

где  $N_i$  – значение  $i$ -го пикселя растровой поверхности, Вт/м<sup>2</sup>;  $10^3$  – коэффициент перехода от Вт к мВт;  $A$  – площадь пикселя, м<sup>2</sup>. Предлагаемый способ оценки величины  $Q_{\Pi}$  может давать несколько завышенные значения за счет эффектов многократного отражения электромагнитных волн от стен помещения. Поэтому для более детальной оценки корректности предлагаемого подхода и в силу отсутствия во время измерений в обследованных помещениях внутренних источников ЭМП РЧ была проведена оценка **энергетического дебета** ( $F$ , дБ(мВт)) оконных проемов, через которые происходило проникновение электромагнитного излучения в помещения.

Для расчета  $F$  были проведены измерения плотности потока энергии (с пространственным разрешением от 0,21 до 0,30 м) в вертикальной плоскости по всей площади оконных проемов в режимах Max и Max average. Затем результаты измерений были интегрированы в цифровые модели окон и на их основе проинтерполированы растровые поверхности (одна из них приведена на рис. 2Б) и с помощью (3) был рассчитан энергетический дебет, т.е. величина мощности, проходящей сквозь окно.

Сравнение энергетических экспозиций помещений и энергетических дебетов их оконных проемов показало, что эти величины находятся в хорошем соответствии при использовании обоих режимов измерений, что может служить доказательством корректности предлагаемого подхода: в большинстве случаев величина  $Q_{\Pi}$  превышала  $F$  на 1,1...3,5 дБ, однако, в среднем по четырем помещениям по абсолютной величине разница между ними была < 2,5 дБ [10], что близко к принятой величине усиления сигнала в точке приема за счет отражений, равной 3 дБ [11] – т.е. надежно идентифицирован основной путь проникновения ЭМП РЧ в помещение. Энергетический дебет отдельных окон варьировался в диапазоне от 1,6 до 3,1 мВт в режиме Max и от 0,7 до 1,5 мВт в режиме Max average, что вполне сравнимо с мощностями излучения устройств Bluetooth и Wi-Fi.

#### Выводы

1. Применение систем геопространственного моделирования при экологическом мониторинге электромагнитных полей радиочастотного диапазона позволяет осуществить: выявление, визуализацию и проведение проблемно-ориентированного анализа пространственной неоднородности ЭМП РЧ посредством перехода с помощью интерполяции от сети дискретных измерений к непре-

рывным растровым поверхностям с заданными метрическими параметрами, описывающим вариации искомого фактора, в том числе посредством интуитивно понятных цветовых шкал.

2. Предложена методология оценки интегральной энергетической экспозиции территории по данным широкополосных частотно-неселективных измерений. На примере городского микрорайона показано, что в диапазоне частот 0,05...3,5 ГГц суммарная пиковая энергетическая экспозиция составила 564,3 Вт (Max), а пиковая с усреднением 229,1 Вт (Max average).

3. С использованием ГИС ArcGIS получены следующие результаты: созданы высокодетализированные цифровые модели помещений, предложена оригинальная методология расчета новых энергетических показателей электромагнитной безопасности: энергетической экспозиции помещения, характеризующей величину общей поглощаемой мощности ЭМП РЧ, и энергетического дебета оконного (или любого другого) проема, характеризующего величину проходящей сквозь него мощности.

4. Энергетический дебет обследованных оконных проемов составил от 0,7 до 3,1 мВт, что сравнимо с мощностями компактных радиопередающих устройств; при отсутствии внутренних источников излучения энергетическая экспозиция помещения и дебет оконных проемов в среднем по абсолютной величине отличаются менее чем на 2,5 дБ, при этом величина различия между указанными параметрами может использоваться как критерий надежности при поиске путей проникновения электромагнитного загрязнения в искомое помещение и выявлении неучтенных источников электромагнитной опасности.

5. Интеграция пространственно разнесенных и/или разновременных данных экологического мониторинга ЭМП РЧ конкретных территорий/помещений в среде систем геопространственного моделирования позволит выйти на принципиально новый уровень объективности оценки электромагнитной безопасности обитаемых сред и поможет в выработке мотивированных решений по оптимизации экологической обстановки.

### Литература

1. Grigoriev Y. Cell Towers – Results of Measurements and Estimation of Safety Limits for the Public. Salzburg: International Conference on Cell Tower Siting, 2000. – P. 47–51.
2. Ammoscato A. et al. GPS-GIS integrated system for electromagnetic pollution //The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008. – Vol. XXXVII.– Part B1. – P. 491–498.
3. Abdelati M. Electromagnetic radiation from mobile phone base stations at Gaza //Journal of The Islamic University of Gaza (Natural Sciences Series). – 2005. – Vol.13. – № 2.– P. 129–146.
4. Frei P. et al. Temporal and spatial variability of personal exposure to radio frequency electromagnetic fields //Environmental Research. – 2009. – № 6. – P. 779–785.
5. Viel J.-F. et al. Radiofrequency exposure in the French general population: Band, time, location and activity variability //Environment International. – 2009. – № 8. – P. 1150–1154.

6. Mann S.M. et al. Exposure to radio waves near mobile phone base stations. Chilton: National Radiation Protection Board, 2000. – 55 p.

7. Viel J.-F. et al. Residential exposure to radiofrequency fields from mobile phone base stations, and broadcast transmitters: a population-based survey with personal meter //Occupational and Environmental Medicine. – 2009. – № 66. – P. 550–556.

8. Допустимые параметры электромагнитных излучений в помещениях жилых и общественных зданий и на сельских территориях МГСН 2.03-97. М.: Научно-исследовательский и информационно-аналитический издательский центр (НИАЦ), 1997. – 15 с.

9. Потапов А.А., Захаров П.Н. Методология широкополосных измерений в экологическом мониторинге электромагнитных излучений радиочастотного диапазона //Научомкие технологии. – 2009. – № 8. – Т. 10. – С. 59 – 67.

10. Потапов А.А. Совершенствование методологии оценки электромагнитной безопасности помещений с привлечением геоинформационных технологий //Нелинейный мир. – 2010. – № 10 – С. 629 – 636.

11. Bornkessel C. et al. Determination of the general public exposure around GSM and UMTS base stations //Radiation Protection Dosimetry. – 2007.– № 1. – P. 40 – 47.

## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ВБЛИЗИ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА

Потапова И.Ю.

*Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН*

### Введение

Горно-обогатительный комбинат и г. Костомукша были построены на северо-западе Карелии в 1977-1985 гг. С введением комбината в эксплуатацию возросло антропогенное воздействие на природную среду. Оно связано с газовыми и пылевидными производственными выбросами, сбросом хозяйственно-бытовых сточных вод города в систему р. Контоikki и техногенных вод в систему р. Кенти. Исследования поверхностных вод Костомукшского железорудного месторождения проводились Институтом водных проблем Севера Карельского научного центра РАН до освоения природных ресурсов региона и продолжались после введения комбината в действие (Поверхностные воды..., 2001). Для оценки последствий антропогенного воздействия комбината на окружающую среду проводились систематические наблюдения за составом снежного покрова (Feoktistov, Lazareva, 1994), (Поверхностные воды..., 2001), которые продолжают и по сегодняшний день. В данной работе представлены результаты исследований за 2007 год.

### Объекты исследования и методы анализа

Отбор проб снега производился в лесу на открытом месте. В каждой точке снег отбирался отдельно с поверхностного слоя (номер пробы обозначен цифрой и буквой “п”) и на всю глубину снежного покрова (пробы отмечены цифрой). Пробы 1п-1, 4п-4 были отобраны на расстоянии ~15 км западнее г. Костомукши, пробы 5п-5 – на 13 км южнее г. Костомукши, а точки отбора проб 2п-2, 3п-3 наиболее

приближены к горно-обогатительному комбинату (рис. 1). Общее количество проб составило 10 шт.

При отборе использовались одноразовые полиэтиленовые перчатки и пакеты. После чего пробы были доставлены в лабораторию гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН для химического анализа. В талых снеговых водах были определены следующие показатели: рН, щелочность,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ , ПО, биогенные элементы ( $P_{мин}$ ,  $P_{общ}$ ,  $NH_4^+$ ,  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $N_{орг}$ ,  $N_{общ}$ ), литофильные элементы ( $Fe_{общ}$ ,  $Mn$ ,  $Al$ ,  $Si$ ), тяжелые металлы ( $Zn$ ,  $Cu$ ,  $Ni$ ,  $Cd$ ).

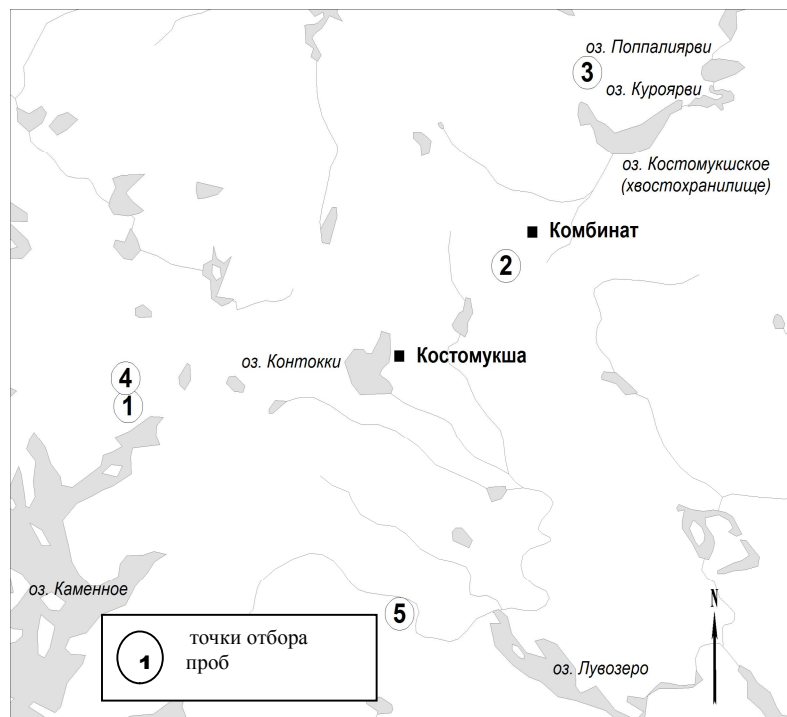


Рис. 1. Карта-схема района г. Костомукши и точки отбора проб снега

Аналитическая работа проводилась в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН, аккредитованной Госстандартом России (№ РОСС RU.0001.512673 от 09.03.2004 г.). Для химического анализа использованы аттестованные методики.

#### Химический состав атмосферных осадков района Костомукши

Результаты анализов показали, что значение рН в большинстве проб снега ниже величины водородного показателя для чистых атмосферных осадков (5.6) (Израэль и др., 1989). Изменяясь в пределах от 4.84 до 5.97 (табл. 1), рН в среднем

составило 5.03, что близко к среднему значению для атмосферных осадков Карелии (5.0) (Лозовик, Потапова, 2006). Следует отметить, что по рН и другим показателям были использованы в качестве средних величин медианные значения.

В ионном составе талой снеговой воды отмечено повышенное содержание ионов калия, что связано с влиянием пылевидных выбросов Костомукшского горно-обогатительного комбината, содержащих  $K_2CO_3$ . Концентрация ионов калия в исследуемом снеге изменялась в пределах 0.02-0.22 мг/л (см. табл. 1), составляя в среднем 0.07 мг/л. Это значение близко к ранее установленному среднему (0.1 мг/л) для этого района, в то время как в других районах Карелии содержание  $K^+$  изменялось в пределах 0.04-0.08 мг/л (Состояние водных..., 2007). Наибольшие концентрации  $K^+$  отмечены вблизи ГОКа (ст. 2 и 3).

Гидрокарбонаты были обнаружены только в одной из исследованных проб снега ( $Alk = 0.73$  мг  $HCO_3^-/л$ ). Здесь же наблюдалось и повышенное содержание калия (0.18 мг/л) и значение рН (5.97). Во всех остальных пробах в связи с их кислыми свойствами гидрокарбонаты отсутствовали.

Содержание ионов натрия и магния в пробах талой снеговой воды низкое и варьировало от 0.09 до 0.31 мг/л и от 0.01 до 0.09 мг/л соответственно (см. табл. 1).

В катионном составе исследованных осадков существенную долю имеет ион кальция. Его содержание изменялось в пределах от 0.04 до 0.79 мг/л (см. табл. 1), в среднем составляя 0.15 мг/л, что меньше полученных ранее медианных значений для этого региона (0.19-0.56 мг/л) и Карелии в целом (0.18-0.74) для разных лет наблюдений (Состояние водных..., 2007).

Таблица 1. Ионный состав (мг/л), рН и щелочность талых снеговых вод

№ пробы	$K^+$	$Na^+$	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$SO_4^{2-}$	$Cl^-$	рН	Alk, мг $HCO_3^-/л$
1п	0.02	0.24	0.11	0.04	0.65	0.52	4.99	-0.73
1	0.03	0.21	0.15	0.04	0.65	0.53	4.84	-0.85
2п	0.12	0.21	0.15	0.03	0.46	0.53	5.18	-0.18
2	0.18	0.31	0.79	0.07	1.71	0.73	5.97	0.73
3п	0.11	0.13	0.20	0.03	0.98	0.40	5.10	-0.30
3	0.22	0.22	0.51	0.09	1.17	0.75	5.22	-0.34
4п	0.05	0.19	0.07	0.02	0.48	0.49	4.97	-0.61
4	0.04	0.16	0.10	0.03	0.63	0.57	4.89	-0.85
5п	0.04	0.09	0.04	0.01	0.46	0.41	5.07	-0.48
5	0.09	0.20	0.21	0.05	0.86	0.57	4.97	-0.48

Содержание сульфатов в снеговых пробах невысокое и колебалось в пределах от 0.46 до 1.71 мг/л (см. табл. 1). Наибольшая их концентрация (1.71 мг/л) отмечена в пробе № 2, в которой наблюдалось повышенные значения кальция (0.79 мг/л) и величины рН (5.97). Скорее всего, сульфаты здесь были представлены в виде солей, а не в кислотной форме как во всех остальных пробах (табл. 2).

Концентрация хлоридов в пробах снега небольшая и в среднем составила 0.53 мг/л. Используя данные по хлоридам и их соотношение с другими элементами в конденсатах над океаном (Корж, 1971), можно рассчитать количество антропогенных (неморского происхождения) продуктов в атмосферных осадках (табл. 3).

Выпадение сульфатов, кальция и калия с атмосферными осадками связано главным образом с антропогенным влиянием. При удалении от комбината доля калия неморского происхождения значительно уменьшается или отсутствует совсем.

**Таблица 2.** Минерализация и ионный состав атмосферных осадков

№ пробы	$\Sigma_{\text{и}}$ , мг/л	$\Sigma_{\text{кат}}$ , ммоль-экв/л	$\Sigma_{\text{ан}}$ , ммоль-экв/л	pH	Ионный состав, %-экв
1п	1.86	0.035	0.030	4.99	$\text{Na}_3\text{O}_2\text{H}_2\text{Ca}_2\text{NH}_4\text{Mg}_9\text{K}_2$ $\text{SO}_4\text{Cl}_4\text{NO}_3\text{I}_0$
1	1.94	0.041	0.031	4.84	$\text{H}_3\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{NH}_4\text{Mg}_8\text{K}_2$ $\text{SO}_4\text{Cl}_4\text{NO}_3\text{I}_2$
2п	1.68	0.032	0.025	5.18	$\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{H}_2\text{NH}_4\text{K}_1\text{Mg}_8$ $\text{Cl}_5\text{SO}_4\text{NO}_3\text{I}_8$
2	4.76	0.067	0.069	5.97	$\text{Ca}_5\text{Na}_2\text{Mg}_8\text{K}_7\text{NH}_4\text{H}_2$ $\text{SO}_4\text{Cl}_2\text{HCO}_3\text{I}_7\text{NO}_3\text{I}_4$
3п	1.99	0.031	0.032	5.10	$\text{Ca}_3\text{H}_2\text{Na}_1\text{K}_9\text{Mg}_8\text{NH}_4\text{I}_7$ $\text{SO}_4\text{Cl}_3\text{NO}_3\text{I}_5$
3	3.24	0.056	0.047	5.22	$\text{Ca}_4\text{Na}_1\text{Mg}_1\text{H}_3\text{NH}_4\text{K}_1\text{NO}_3\text{I}_4$ $\text{SO}_4\text{Cl}_2\text{NO}_3\text{I}_8$
4п	1.53	0.029	0.025	4.97	$\text{H}_3\text{Na}_2\text{NH}_4\text{Ca}_1\text{Mg}_6\text{K}_4$ $\text{Cl}_5\text{SO}_4\text{NO}_3\text{I}_0$
4	1.75	0.032	0.030	4.89	$\text{H}_4\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{NH}_4\text{Mg}_8\text{K}_3$ $\text{Cl}_4\text{SO}_4\text{NO}_3\text{I}_9$
5п	1.20	0.019	0.022	5.07	$\text{H}_4\text{Na}_2\text{NH}_4\text{Ca}_1\text{K}_5\text{Mg}_4$ $\text{SO}_4\text{Cl}_5\text{NO}_3\text{I}_7$
5	2.18	0.039	0.035	4.97	$\text{H}_2\text{Ca}_2\text{Na}_2\text{Mg}_1\text{NH}_4\text{K}_6$ $\text{SO}_4\text{Cl}_5\text{NO}_3\text{I}_7$

**Таблица 3.** Доля ионов неморского происхождения в атмосферных осадках (%)

№ пробы	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{K}^+$
1п	77	64	0
1	77	73	0
2п	67	73	58
2	88	94	67
3п	89	85	73
3	82	90	68
4п	71	57	20
4	75	60	0
5п	74	25	0
5	81	81	45

Атмосферные осадки являются важным источником поступления на сушу биогенных веществ. В исследованных пробах концентрации фосфора минерального и фосфора общего колебались в пределах 1–2.8 мг/л и 5.2–26.2 мг/л соответственно (табл. 4). Максимальные их концентрации обнаружены в пробе № 3 ( $P_{\text{мин}} = 12$  мг/л,  $P_{\text{общ}} = 31$  мг/л). Распределение азотистых соединений в пробах снега выглядело следующим образом: содержание нитратного и органического азота было на одном уровне и в среднем составило 0.16 мгN- $\text{NO}_3^-$ /л и 0.17 мгN- $\text{N}_{\text{орг}}$ /л. Концентрация ионов аммония изменялась в пределах 0.04–0.11 мгN/л, а количество нитритов не превышало 1 мгN/л (см. табл. 4).

Проба снега № 3 отличалась наибольшим содержанием биогенных элементов и органического вещества (по перманганатной окисляемости) – 3.67 мгO/л. Для всех остальных проб содержание органического вещества находилось в диапазоне от 1.54 до 3.50 мгO/л (см. табл. 4). Эти концентрации незначительны, что в целом характерно для атмосферных осадков.

**Таблица 4.** Органическое вещество и биогенные элементы в талых снеговых водах

№ пробы	ПО, мгO/л	мкг/л		мгN/л				
		$P_{\text{мин}}$	$P_{\text{общ}}$	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_2^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{N}_{\text{орг}}$	$\text{N}_{\text{общ}}$
1п	1.75	0.7	10.0	0.09	<0.001	0.19	0.19	0.47
1	1.54	0.2	10.0	0.11	<0.001	0.22	0.08	0.41
2п	1.75	2.8	8.7	0.06	<0.001	0.12	0.16	0.34
2	1.96	5.0	26.2	0.05	0.001	0.19	0.21	0.45
3п	1.84	0.0	9.2	0.04	<0.001	0.10	0.18	0.32
3	3.67	11.7	31.0	0.04	0.001	0.24	0.31	0.59
4п	1.92	1.2	5.2	0.07	<0.001	0.16	0.10	0.33
4	3.50	0.9	16.4	0.06	<0.001	0.16	0.15	0.37
5п	1.84	2.3	8.2	0.05	<0.001	0.10	0.18	0.33
5	2.13	0.7	13.6	0.05	<0.001	0.15	0.10	0.30

Распределение  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  в снеговых пробах выглядело следующим образом: повышенные его концентрации наблюдались в пробах, отобранных вблизи ГОКа (0.31 и 0.82 мг/л), для остальных пределы колебаний были ниже: 0.047–0.155 мг/л (табл. 5). Средняя концентрация составила 0.10 мг/л. Это значение чуть выше данных, полученных ранее для этого района (Состояние водных..., 2007). Для алюминия отмечалась аналогичная картина: максимальные концентрации обнаружены в пробах близких к ГОКу (0.18 и 0.34 мг/л), в других пробах содержание этого элемента составляло не более 0.06 мг/л (см. табл. 5). Что касается марганца, то его концентрация менялась от 0.004 до 0.024 мг/л (см. табл. 5). Наличие кремния в атмосферных осадках говорит о «загрязнении» их терригенными частицами. В исследуемых снеговых пробах он находился в пределах 0.001–0.148 мг/л (см. табл. 5), причем наименьшие концентрации были отмечены в поверхностных слоях, чем в пробах снега, отобранных на всю глубину снежного покрова.

Таблица 5. Микроэлементы в талых снеговых водах, мг/л

№ пробы	Fe <sub>общ</sub>	Mn	Al	Si
1п	0.047	0.004	0.030	0.012
1	0.092	0.008	0.034	0.148
2п	0.062	0.023	0.044	0.006
2	0.310	0.011	0.180	0.049
3п	0.107	0.013	0.041	0.012
3	0.816	0.024	0.342	0.031
4п	0.155	0.004	0.030	0.001
4	0.099	0.014	0.055	0.006
5п	0.117	0.019	0.027	0.001
5	0.054	0.006	0.049	0.012

Таблица 6. Содержание тяжелых металлов в талой снеговой воде, мкг/л

№ пробы	Zn	Cu	Ni	Cd
1п	388.0	0.4	0.63	0.01
1	8.0	<0.1	<0.1	0.03
2п	3.9	<0.1	0.23	<0.01
2	8.2	7.4	1.37	0.03
3п	7.3	0.2	0.51	0.19
3	3.0	0.7	1.59	0.02
4п	3.7	0.2	<0.1	<0.01
4	4.7	0.2	<0.1	<0.01
5п	8.3	0.3	0.06	0.01
5	12.5	<0.1	<0.1	0.03
ПДК	10	1	10	5

Среди тяжелых металлов Zn, Cu, Ni, Cd можно отметить повышенные концентрации меди и никеля в пробах № 2 (Cu – 7.4; Ni – 1.37 мкг/л) и № 3 (Cu – 0.7; Ni – 1.59 мкг/л), а в пробе № 3п кадмия (Cd – 0.19 мкг/л). Для всех остальных проб содержание этих элементов не превышало: Cu – 0.4 мкг/л; Ni – 0.63 мкг/л; Cd – 0.03 мкг/л и было меньше ПДК для рыбохозяйственных водоемов. Содержание Zn в снеге колебалось в диапазоне 3.0-12.5 мкг/л и только в пробе № 1 его концентрация достигала 388.0 мкг/л, что, вероятно, связано с неправильным отбором или с использованием оцинкованной емкости для таяния снега (табл. 6).

#### Заключение

Исследования атмосферных осадков в районе Костомукши показали, что в пробах снега, отобранных вблизи горно-обогатительного комбината, наблюдались повышенные концентрации калия, кальция, Fe<sub>общ</sub>, Al, Cu, Ni и Cd. Все пробы, за исключением одной, имели низкие значения pH (4.84-5.22). Общей закономерностью распределения P<sub>общ</sub>, Fe, Si по вертикали является меньшее их содержание в поверхностных слоях, чем в пробах, отобранных на всю глубину снежного покро-

ва. Это, по-видимому, связано с периодическим таянием снега и диффузионным поступлением этих элементов из почвы. Для других компонентов такой картины не наблюдалось.

#### Литература

1. Израэль Ю.А., Назаров И.М., Филиппова Л.М. и др. Кислотные дожди. Л., 1989. 206 с.
2. Корж В.Д. Расчет соотношений химических компонентов морской воды, переходящих из океана в атмосферу при испарении // Океанология. М., 1971. №5. С. 881–887.
3. Лозовик П.А., Потапова И.Ю. Поступление химических веществ с атмосферными осадками на территории Карелии // Водные ресурсы, 2006. Т. 33, № 1. С. 111–118.
4. Поверхностные воды Калевальского района и территории Костомукши в условиях антропогенного воздействия, Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 168 с.
5. Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг., Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 200с.
6. Feoktistov V.M., Lazareva I.P. Snow contamination caused by an ore-dressing mill // Acidification of inland waters. Helsinki, 1994. P. 51-60.