

*International Journal for*  
**Computational Civil and Structural Engineering**  
*Volume 7, Issue 2* *2011*

---

**EXECUTIVE EDITOR**

**Valery I. Telichenko**, Professor, Rector  
Moscow State University of Civil Engineering  
Moscow, Russia  
26, Yaroslavskoe Shosse, 129337, Moscow, Russia

**EDITOR-IN-CHIEF**

**Vladimir N. Sidorov**, Professor  
Department of Applied Mathematics  
and Computer Science  
Moscow State University of Civil Engineering  
26, Yaroslavskoe Shosse, 129337, Moscow, Russia

**TECHNICAL EDITOR**

**Taymuraz B. Kaytukov**, Associate Professor  
Research & Educational Center  
of Computational Simulation  
Moscow State University of Civil Engineering  
26, Yaroslavskoe Shosse, 129337 Moscow, Russia

**ASSOCIATE EDITORS**

**Pavel A. Akimov**, Professor  
Department of Applied Mathematics  
and Computer Science  
Moscow State University of Civil Engineering  
26, Yaroslavskoe Shosse, 129337 Moscow, Russia

**Radii P. Fedorenko**, Professor  
Institute of Applied Mathematics  
Russian Academy of Sciences  
4, Miusskaya Pl., Moscow, Russia

**Alexander M. Belostotsky**, Professor  
Research Center STADYO  
apt. 412, 34, Ul. Verkhnyaya,  
125040, Moscow, Russia

**Gregory P. Panasenko**, Professor  
Equipe d'Analyse Numerique  
NMR CNRS 5585  
University Gean Mehnet  
23 rue. P.Michelon 42023, St.Etienne, France

**Vladimir Belsky**, Ph.D.  
Abaqus Inc.,  
Pawtucket, RI 02860,  
1080 Main Street, USA

**Boris E. Pobedria**, Professor  
Department of Mechanics and Mathematics  
Moscow State University  
MGU. Mech-Math. Vorobjovy Gory  
119899 Moscow, Russia

**Mikhail Belyi**, Professor  
Abaqus Inc.,  
Pawtucket, RI 02860,  
1080 Main Street, USA

**Vitaly Bulgakov**, Professor  
Parametric Technology Corp.,  
57 Metropolitan Av.,  
Ashland, MA, USA

**Leonid A. Rozin**, Professor  
Department of Structural Mechanics  
Technical University St. Petersburg  
29, Ul. Politechnicheskaya,  
195251 St. Petersburg, Russia

**PUBLICATION COUNCIL**

**William Begell**, President  
Begell Publishing House  
USA

**Nadezhda S. Nikitina**, Director  
ASV Publishing House  
Moscow, Russia

**Valery I. Telichenko**, Rector  
Moscow State University  
of Civil Engineering  
Moscow, Russia

## ADVISORY EDITORIAL BOARD

**Nikolaj V. Banichuk**, Professor  
Institute for Problems in Mech.  
Russian Academy of Sciences  
101, Prosp. Vernadskogo  
117526, Russia

**Klaus-Jürgen Bathe**, Professor  
Department of Mechanical  
Engineering  
Massachusetts Institute of  
Technology  
Cambridge, MA 02139, USA

**Zdenek Bittnar**, Professor  
Department of Structural Mechanics  
Czech Technical University  
7, Thakurova, 16629 Prague 6  
Czech Republic

**Alexander S. Bratus**, Professor  
Dept. of Comp. Math. and  
Cybernetics; Moscow State University  
MGU, VMK, Vorobjovy Gory  
119899 Moscow, Russia

**Evgeny G. D'yakonov**, Professor  
Dept. of Comp. Math. and  
Cybernetics; Moscow State University  
MGU, VMK, Vorobjovy Gory  
119899 Moscow, Russia

**Alexander S. Gorodetsky**  
The Inst. For Aut. Syst. in Civil Eng.  
2a, Ul. M. Krivonosa  
252180 Kiev, Ukraine

**Vladimir Karpov**, Professor  
St. Petersburg University  
d.4, Ul. 2-Krasnoarmeiskaya,  
St. Petersburg, 198005 Russia

**Galina G. Kashevarova**, Professor  
Department of Structural Mechanics  
and Computer Technology  
Perm State Technical University  
29, Komsomolsky Prospekt,  
Perm, 614990, Russia

**Hartmut Koppler**, Professor  
Bauhaus-Universitat  
31a, Windmuhlen Str.  
99425 Weimar, Germany

**Andrey V. Korgin**, Professor  
Structure Testing Department  
Moscow State Univ. of Civil  
Engineering  
26, Yaroslavskoe Shosse,  
129337 Moscow, Russia

**Vadim G. Korneev**, Professor  
Dept. of Math. and Mechanics  
St. Petersburg State University  
198904, St. Petersburg, Russia

**Elena A. Korol**, Professor  
Department of Construction  
Technology; Moscow State Univ. of  
Civil Engineering  
26, Yaroslavskoe Shosse,  
129337 Moscow, Russia

**Sergey V. Kuznetsov**, Professor  
Institute for Problems in Mech.  
Russian Academy of Sciences  
101, Prosp. Vernadskogo,  
117526, Russia

**Pierre Ladeveze**, Professor  
Lab. de Mecanique et Tecnologic  
E.N.S. de Cachan /C.N.R.C./ Univ.  
Paris VI, 61 Av. du President Wilson  
94235 Cachan Cedex, France

**Ralf Lindberg**, Professor  
3, Korkechoulunkatu,  
33101, Tampere, Finland

**Leonid S. Lyakhovich**, Professor  
Tomsk State University  
of Architecture and Building  
2, Solyanaya Pl.,  
634003 Tomsk, Russia

**Herbert Mang**, Professor  
Inst. Fur Haustatiken und  
Festigkeitslehre  
Technische Universitaet Wien  
13, Karlsplatz,  
A-1040 Wien, Austria

**Vladimir L. Mondrus**, Professor  
Department of Structural Mechanics  
Moscow State Univ. of Civil  
Engineering  
26, Yaroslavskoe Shosse,  
129337 Moscow, Russia

**Vladimir I. Myachenkov**, Professor  
Department of Strength of Materials  
Moscow State Tech. Univ. "STANKIN"  
3a, Vadkovsky Per.,  
104472 Moscow, Russia

**L'Eugenio Onate**, Professor  
E.T.S. Ing. Caminos  
Jorge, Girano Salgado, 31-08034  
Barcelona, Spain

**Vladimir A. Palmov**, Professor  
Physical-Mechanical faculty  
Technical University St. Petersburg  
29, Ul. Polytechnicheskaya,  
195251 St. Petersburg, Russia

**Stan Pietruszczak**, Professor  
Department of Civil Engineering  
McMaster University  
Hamilton, Ontario L8S 4L7, Canada

**Chengzhi Qi**, Professor  
Beijing University of Civil  
Engineering and Architecture  
No.1, Zhanlanlu, Xicheng District,  
Beijing

**Ekkerhard Ramm**, Professor  
University of Stuttgart  
Institute for Baustatik  
7, Pfaffenwaldring, Stuttgart,  
Germany

**E. Daya Reddy**, Professor  
University of Cape Town  
Department of Applied Mathematics  
7700 Rondebosch, South Africa

**Sunil Saigal**, Professor  
National Science Foundation  
4201 Wilson Blvd.,  
Arlington, VA 22230, USA

**Vadim N. Savostyanov**, Professor,  
Department of Applied Mechanics  
and Mathematics, Moscow State  
Univ. of Civil Engineering,  
Yaroslavskoe shosse 26, 129337  
Moscow, Russia

**Bernhard A. Scfhrefler**, Professor  
Dipart. Di Costruzioni e Trasporti.  
Via  
Marzolo, 9-35131 Padova, Italy

**Nikolaj N. Shaposhnikov**, Professor  
Department of Comp. Aided Design  
Moscow State Univ. of Railways  
MIIT, 15, Ul. Obraztsova,  
101475 Moscow, Russia

**D.V. Singh**, Professor  
Vice chairman all India council for  
Technical Education, New Delhi,  
India

**Waclaw Szcześniak**, Professor  
15, Al. Armii Ludowej,  
Politechnika Warszawska  
Warsaw, Poland

**Nils-Eric Wiberg**, Professor  
Department of Structural Mechanics  
Chalmers University of Technology  
S-41296 Goteborg, Sweden

**Zbigniew Wojcicki**, Professor  
Wroclaw University of Technology  
11 Grunwaldzki Sq., 50-377,  
Wroclaw, Poland

**Peter Wriggers**, Professor  
Technical School of Department  
1, Hochschulstrabe,  
D-6100 Darmstadt, Germany

## **AIMS AND SCOPE**

**The aim of the Journal** is to advance the research and practice in structural engineering through the application of computational methods. The Journal will publish original papers and educational articles of general value to the field that will bridge the gap between high-performance construction materials, large-scale engineering systems and advanced methods of analysis.

**The scope of the Journal** includes papers on computer methods in the areas of structural engineering, civil engineering materials and problems concerned with multiple physical processes interacting at multiple spatial and temporal scales. The Journal is intended to be of interest and use to researchers and practitioners in academic, governmental and industrial communities.

## **КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ЖУРНАЛЕ INTERNATIONAL JOURNAL FOR COMPUTATIONAL CIVIL AND STRUCTURAL ENGINEERING**

Журнал *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering* является международным периодическим изданием, учредителями и издателями которого выступают ФГБОУ ВПО Московский государственный строительный университет (Издательство АСВ) и Издательство Begell House Inc. (США, г. Нью-Йорк).

В редакционный совет журнала входят известные российские и зарубежные деятели науки и техники. Основным критерий отбора статей для публикации в журнале – их высокий научный уровень, соответствие которому определяется в ходе высококвалифицированного рецензирования и объективной экспертизы, поступающих в редакцию материалов.

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций.

Журнал зарегистрирован в Федеральном агентстве по средствам массовой информации и охраны культурного наследия Российской Федерации. Индекс в общероссийском каталоге РОСПЕЧАТЬ – 18076.

## GUIDELINES FOR PREPARATION OF MANUSCRIPT AND RELATED INFORMATION

*Vladimir N. Sidorov<sup>1</sup>, Pavel A. Akimov<sup>2</sup>, Taymuraz B. Kaytukov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Editor-in-Chief of International Journal for Computational Civil and Structural Engineering

<sup>2</sup>Deputy Editor-in-Chief of International Journal for Computational Civil and Structural Engineering

<sup>3</sup>Technical Editor of International Journal for Computational Civil and Structural Engineering

**ABSTRACT:** Each paper must be typed on snow white paper sheets of A4 (210x297mm) size only on one side in boxes as shown on this sample. The abstract must be typed in 16 cm width box. The text of paper in the first page must be written in two columns 8.25 cm in width. All next pages must also have two columns 8.25 cm in width. Each page should have margins: 32 mm top, 32 mm bottom and 20 mm right and left. The paper should be typed using 12 point size Times New Roman type-face, or very similar, using single spacing between text lines applying word processor and printed on laser printer. It can be here pointed such editors as Word for Windows (preferable), Word Perfect, Tex or LaTeX. The appearance of manuscript of paper should be similar as far as possible to this sample. The paper should be submitted by traditional post: the original with 2 copies for review and the electronic version on diskette or on CD.

**Key words:** International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, preparation of manuscripts, electronic image preparation, submission of peer reviews and accepted articles.

### 1. PREPARATION OF MANUSCRIPTS

This document is typed by Microsoft Word 2003 and Times New Roman 12 point size type-face.

**The material of the paper should be arranged as follows:** Title (16 points), Author(s) (14 point), Affiliation(s), Abstract, key words, Introduction, Main body of paper, Acknowledgements (if any), References (if any, 10 points), Appendices (if any), full authors addresses as endnote (10 points, spacing within endnote=1, style for numbering=numbers, line separating text and endnotes=line – margin to margin in right column).

**The title, author's name(s) and affiliation(s)** should be given in a style similar to that shown above in this sample and centered. **The headings** should be bold and aligned to left. First-order headings and parts of the text should be separated by one free line from the text. Second-order headings should have capital first letters.

The both columns of each page, including closing page, should be of equal length. At the bottom of the last right column of last page is endnote with author's address(es).

**The figures** can be embedded in word processor or must be drawn in black ink. **Drawings** can be produced directly on manuscript sheet or may be produced on separate piece of white paper and then stuck at the appropriate position. **Photographs** must be glossy black and white prints and stuck at the appropriate position. This also applies to other items such as **tables**. The best – drawings, photographs and tables should be typed by word processor. **All symbols including equations should be typed.**

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij} \lambda \varepsilon + 2 \mu \varepsilon_{ij}. \quad (1)$$

However, **sometimes embedding figure files in Microsoft Word is not acceptable for final output**, because of the loss of resolution. In this connection author may save in addition all or selected files with figures separately on diskette or CD. **Acceptable formats for figures** are JPEG, TIFF or EPS files saved from original application at 300-600 dpi.

The Figures, line drawings, photographs, tables may be positioned either within the one column, or large centered exactly across the full width of the page. The equations should be numbered at

the right side of the column. **The references** should be given at the end of the paper. The Figures, Tables and Equations should be separated from the text by minimum one single free line.

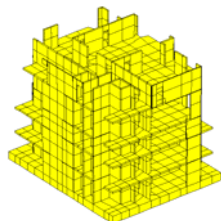


Figure 1

**The manuscript is expected to be written in correct and easily readable English.** An author who is not proficient in English is advised to take help of linguist before typing. It should be thoroughly checked for spelling mistakes.

## 2. SUBMISSION FOR PEER REVIEW

**Authors in all countries, at their opinion, should send** three (3) copies of their manuscript to Editors-in-Chief professor Vladimir N. Sidorov (see chapter 4 Correspondence) or Technical editor associate professor Taymuraz B. Kaytukov. **Electronic submissions are encouraged. Email a PDF or DOC (Microsoft Word) file with manuscript** to the Editor-in-Chief or technical editor. The Editor-in-Chief will seek reviews of the paper from experts and will assure rapid turnaround within six months of submission. **Each manuscript will receive at least 2 reviews. In deciding on acceptance of the paper, experts will examine** originality, quality of contents, neatness of presentation and readability of the submitted text. The Editor-in-Chief will correspond with the author in the light of these reviews. Submission implies that the author will be willing to make any necessary revisions. Retain all original figures until conclusion of the review process.

## 3. SUBMISSION OF ACCEPTED ARTICLE

After manuscript has been accepted and all required revisions have been incorporated, **mail manuscripts (black & white) and two copies**

**to Editor-in-Chief** by traditional post. The envelope for A4 sheets with stiffener may be used. **The electronic version of the manuscript on diskette or CD must be mailed to Editor-in-Chief** as well. **Label CD or diskette with author's last name(s), title of the article, abbreviated journal name and date.** Please provide a list of the software programs used for the art and text and the file names on the disk.

## 4. CORRESPONDENCE

Enquires regarding International Journal for Computational Civil and Structural Engineering and manuscripts should be addressed to the

### ➤ Editor-in-Chief

Professor Vladimir N. Sidorov  
Department of Applied Mathematics  
and Computer Science  
Moscow State University of Civil Engineering,  
26, Yaroslavskoe Shosse, 129337 Moscow, Russia  
*e-mail:* sidorov.vladimir@gmail.com

### ➤ Technical Editor

Associate Professor Taymuraz B. Kaytukov  
Research & Educational Center  
of Computational Simulation  
Moscow State University of Civil Engineering,  
26, Yaroslavskoe Shosse, 129337 Moscow, Russia  
*e-mail:* niccm@mgsu.ru

## REFERENCES

1. Fish J. and Belsky V. Multigrid method for a periodic heterogeneous medium. Part 1: Convergence studies in 1-D case. *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.*, 126, 1995, pp. 1-16.
- 1) Vladimir N. Sidorov, Department of Applied Mathematics and Computer Science, Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Shosse, 129337, Moscow, RUSSIA, E-mail: sidorov.vladimir@gmail.com.
- 2) Pavel A. Akimov, Department of Applied Mathematics and Computer Science, Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Shosse, 129337, Moscow, RUSSIA, E-mail: pavel.akimov2@gmail.com.
- 3) Taymuraz B. Kaytukov, Research & Educational Center of Computational Simulation, Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Shosse, 129337, Moscow, RUSSIA, E-mail: niccm@mgsu.ru.

# ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ ДЛЯ ЖУРНАЛА INTERNATIONAL JOURNAL FOR COMPUTATIONAL CIVIL AND STRUCTURAL ENGINEERING

*В.Н. Сидоров<sup>1</sup>, П.А. Акимов<sup>2</sup>, Т.Б. Кайтуков<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Главный редактор журнала International Journal for Computational Civil and Structural Engineering

<sup>2</sup>Заместитель главного редактора журнала of International Journal for Computational Civil and Structural Engineering

<sup>3</sup>Технический редактор журнала of International Journal for Computational Civil and Structural Engineering

**АННОТАЦИЯ:** Каждая статья представляется в электронном и печатном виде (бумага белая, размер А4 (210x297 мм), печать односторонняя – см. настоящий образец). Язык публикации статей – английский (предпочтительно) или русский, при этом в случае публикации статьи на русском языке аннотация статьи, ключевые слова, сведения об авторах и название статьи должны быть представлены авторами на английском языке. Текст должен быть подготовлен в программе Microsoft Word (формат файла – DOC), желательно также предоставление копии статьи в формате PDF. Аннотация печатается в поле шириной 16 см. Текст на первой странице статьи печатается в две колонки, шириной 8.25 см каждая. Поля: верхнее – 32 мм., нижнее – 32 мм., правое – 20 мм., левое – 20 мм. Основной шрифт для набора статьи – Times New Roman, 12 пт., межстрочный интервал – одинарный. Внешний вид статьи по форме оформления должен соответствовать настоящему образцу. Печатные экземпляры статьи (оригинал и две копии) и ее электронная форма (на дискете или компакт-диске) должны пересылаться по почте. Для пересылки электронной формы дополнительно необходимо использовать электронную почту.

**Ключевые слова:** International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, подготовка статьи, подготовка электронных версий, рецензирование

## GUIDELINES FOR PREPARATION OF MANUSCRIPT AND RELATED INFORMATION

*Vladimir N. Sidorov<sup>1</sup>, Pavel A. Akimov<sup>2</sup>, Taymuraz B. Kaytukov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Editor-in-Chief of International Journal for Computational Civil and Structural Engineering

<sup>2</sup>Deputy Editor-in-Chief of International Journal for Computational Civil and Structural Engineering

<sup>3</sup>Technical Editor of International Journal for Computational Civil and Structural Engineering

**ABSTRACT:** Each paper must be typed on snow white paper sheets of A4 (210x297mm) size only on one side in boxes as shown on this sample. The abstract must be typed in 16 cm width box. The text of paper in the first page must be written in two columns 8.25 cm in width. All next pages must also have two columns 8.25 cm in width. Each page should have margins: 32 mm top, 32 mm bottom and 20 mm right and left. The paper should be typed using 12 point size Times New Roman type-face, or very similar, using single spacing between text lines applying word processor and printed on laser printer. It can be here pointed such editors as Word for Windows (preferable), Word Perfect, Tex or LaTeX. The appearance of manuscript of paper should be similar as far as possible to this sample. The paper should be submitted by traditional post: the original with 2 copies for review and the electronic version on diskette or on CD.

**Key words:** International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, preparation of manuscripts, electronic image preparation, submission of peer reviews and accepted articles.

### 1. ПОДГОТОВКА СТАТЕЙ

Настоящий образец подготовлен в текстовом процессоре Microsoft Word 2003, используется шрифт Times New Roman, 12 пт.

**Материал статьи должен располагаться следующим образом:** Заголовок (Times New Roman, 16 пт.), авторы (Times New Roman, 14 пт.), сведения об авторах, аннотация, ключевые слова (Times New Roman, 10 пт.).

При публикации статьи на русском языке далее располагаются Заголовок (Times New Roman, 16 пт.), авторы (Times New Roman, 14 пт.), сведения об авторах, аннотация, ключевые слова (Times New Roman, 10 пт.) на английском языке). Введение, основной текст статьи, приложения и замечания печатаются с использованием шрифта Times New Roman, 12 пт.; список литературы, развернутые сведения об авторах – Times New Roman, 10 пт. Межстрочный интервал – одинарный. Выравнивание в тексте – по ширине, выравнивание формул – по правому краю, формулы желательнее нумеровать.

**Заголовок статьи, сведения об авторах** представляются в форме, приведенной в настоящем образце, выравнивание по центру. **Подзаголовки в статье** выделяются полужирным шрифтом с выравниванием по левому краю. Подзаголовки первого уровня должны быть отделены от основного текста одной пустой строкой, подзаголовки второго уровня выделяются курсивом.

Обе колонки на каждой странице, включая последнюю, должны иметь одинаковую длину. В конце статьи должны быть приведены развернутые сведения об авторах, содержащие в том числе их контактные данные (на двух языках при публикации статьи на русском языке).

**Рисунки** (черно-белые) должны быть вставлены в текст статьи или приложены в бумажном виде на отдельных листах, с указанием в каких местах статьи их следует расположить. То же касается и **фотографий**, формат фотографий – черно-белый. Желательно прилагать электронные версии рисунков и фотографий! Аналогичные требования касаются **таблиц**. Наилучший вариант такой, когда рисунки, фотографии и таблицы вставлены в файл, подготовленный в Microsoft Word. **Все символы, в том числе используемые в уравнениях, должны быть печатными.**

$$\sigma_{ij} = \delta_{ij} \lambda \varepsilon + 2 \mu \varepsilon_{ij}. \quad (1)$$

Однако, **рисунки и фотографии, вставленные в файл текстового процессора Microsoft Word не всегда имеют приемлемое для печати качество** из-за их низкого разрешения. В этой связи автору настоятельно рекомендуется дополнительно приложить (на дискете или компакт-диске) к статье файлы, содержащие рисунки. **Допустимые форматы для рисунков** – JPEG, TIFF или EPS, разрешение – 300-600 dpi.

Рисунки, фотографии и таблицы, в случае их больших размеров, также могут располагаться в одну колонку с выравниванием по ширине. Формулы в статье нумеруются с выравниванием по правому краю. **Список литературы** должен быть приведен в конце статьи. Рисунки, фотографии и таблицы должны быть отделены от основного текста как минимум одной пустой строкой.

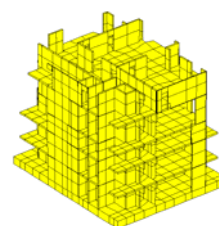


Рисунок 1

**Предполагается, что статья написана на грамотном и хорошо читаемом английском или русском языке.** При необходимости, перед отправкой статьи авторам следует проконсультироваться у переводчиков. Статья не будет подробно проверяться редакцией на предмет наличия лингвистических ошибок. В тоже время редакция оставляет за собой право отклонить статью, при наличии в последней большого количества ошибок лингвистического характера.

## 2. ОТПРАВКА СТАТЬИ НА РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ

**Авторы (из России и других стран) должны выслать в адрес редакции три печатных экземпляра статьи на имя главного редактора журнала, профессора Сидорова Вла-**

димира Николаевича (контактная информация приведена в разделе «Контактные данные») или техническому редактору журнала, доценту Кайтукову Таймуразу Батразовичу. Электронные версии статей необходимо выслать также по электронной почте главному редактору журнала. Электронные и печатные формы не возвращаются. Каждая приходящая в редакцию журнала статья направляется для рассмотрения экспертам соответствующего профиля. **Как правило, по каждой статье назначаются два эксперта.** Время проведения экспертизы статьи не может превышать 6 месяцев. Свои заключения и оценки по статье эксперты сообщают главному редактору журнала, при этом на каждую статью должно прийти не менее двух заключений. Замечания и предложения экспертов доводятся до сведения автора статьи, после чего он вносит все необходимые изменения.

### 3. ОТПРАВКА СКОРРЕКТИРОВАННОЙ СТАТЬИ

После одобрения экспертами статьи и внесения авторами всех необходимых изменений, окончательный вариант статьи (бумажный в трех экземплярах и электронной на дискете или компакт-диске) высылается в адрес редакции, например в жестком конверте формата А4 по почте. **Также необходимо послать электронную версию статьи по электронной почте главному редактору.** На дискете или компакт-диске необходимо написать имена авторов, название статьи, название журнала и дату. Также желательно указать список программ, которые использовались при подготовке статьи и список файлов, находящихся на дискете или компакт-диске. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

### 4. КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

По всем вопросам, касающимся журнала International Journal for Computational Civil and Structural Engineering и подготовке статей необходимо обращаться к следующим лицам:

#### ➤ **Главный редактор**

профессор, доктор технических наук  
Сидоров Владимир Николаевич  
ГОУ ВПО Московский государственный  
строительный университет,  
кафедра информатики  
и прикладной математики,  
129337, Россия, г. Москва,  
Ярославское шоссе, дом 26.  
*e-mail: sidorov.vladimir@gmail.com*

#### ➤ **Технический редактор**

доцент, кандидат технических наук  
Кайтуков Таймураз Батразович  
ГОУ ВПО Московский государственный  
строительный университет,  
Научно-образовательный центр  
компьютерного моделирования  
уникальных зданий, сооружений  
и комплексов,  
129337, Россия, г. Москва,  
Ярославское шоссе, дом 26.  
*e-mail: niccm@mgsu.ru*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2008. – 640 с.
2. Леонтьев Н.Н., Соболев Д.Н., Амосов А.А. Основы строительной механики стержневых систем. – М.: Издательство АСВ, 1996. – 541 с.

- <sup>1)</sup> Сидоров Владимир Николаевич, советник РААСН, профессор, доктор технических наук, ФГБОУ ВПО Московский государственный строительный университет, кафедра информатики и прикладной математики, 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, дом 26, e-mail: sidorov.vladimir@gmail.com.
- <sup>2)</sup> Акимов Павел Алексеевич, член-корреспондент РААСН, профессор, доктор технических наук, ФГБОУ ВПО Московский государственный строительный университет, кафедра информатики и прикладной математики, 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, дом 26, e-mail: pavel.akimov2@gmail.com.
- <sup>3)</sup> Кайтуков Таймураз Батразович, ФГБОУ ВПО Московский государственный строительный университет, Научно-образовательный центр компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов, 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, дом 26, e-mail: niccm@mgsu.ru.

*International Journal for*  
**Computational Civil and Structural Engineering**

*Volume 7, Issue 2*

*2011*

**TABLE OF CONTENTS**

<b>Верификация моделей морских волнений и течений в обоснование применения «тяжелых» программных комплексов гидрогазодинамики</b> <i>А.М. Белостоцкий, С.И. Дубинский</i>	<b><u>13</u></b>
<b>Нелинейное конечноэлементное моделирование устойчивости берегозащитных сооружений Имеретинской низменности с учетом фактических и прогнозируемых деформаций берегового откоса</b> <i>А.М. Белостоцкий, С.И. Дубинский</i>	<b><u>19</u></b>
<b>Прогноз ветровых воздействий в зоне большого Сочи на основе численного моделирования задач аэродинамики</b> <i>А.М. Белостоцкий, С.И. Дубинский</i>	<b><u>27</u></b>
<b>Исследование роли подводных каньонов в выносе наносов из береговой зоны восточного побережья Черного моря</b> <i>И.А. Бровченко, В.С. Мадерич</i>	<b><u>39</u></b>
<b>Численное моделирование трехмерной структуры течений в районе глубоководных каньонов восточного побережья Черного моря</b> <i>И.А. Бровченко, В.С. Мадерич, Е.В. Терлецкая</i>	<b><u>47</u></b>
<b>Моделирование волнового режима побережья Имеретинской низменности</b> <i>П.В. Дикий, Н.Н. Дзюба, М.И. Железняк, М.В. Сорокин</i>	<b><u>54</u></b>
<b>Математическое моделирование береговых процессов для обоснования инженерных решений по берегозащите Имеретинской низменности</b> <i>И.Г. Кантаржи, К.П. Мордвинцев</i>	<b><u>64</u></b>
<b>Исследование волнового режима и процессов размыва характерного участка берегоукрепления Имеретинской низменности</b> <i>И.Г. Кантаржи, Н.В. Шунько</i>	<b><u>72</u></b>
<b>Математическое моделирование наката волн и берегового размыва Имеретинского побережья во время экстремальных штормов</b> <i>С.Л. Кивва, М.И. Железняк, П.С. Коломиец, М.В. Сорокин</i>	<b><u>77</u></b>
<b>Влияние порта на динамику Имеретинского берега</b> <i>И.О. Леонтьев</i>	<b><u>85</u></b>

<b>Моделирование штормовых деформаций профиля галечного пляжа</b> <i>И.О. Леонтьев</i>	<b><u>90</u></b>
<b>Защита берегов и откосов гидротехнических сооружений</b> <i>С.И. Рогачко, Н.В. Шунько</i>	<b><u>98</u></b>
<b>Природно-техногенная система:</b> <b>Имеретинская низменность – Олимпийский комплекс</b> <i>А.Д. Потапов, А.А. Лаврусевич, А.В. Горностаев, М.Е. Лейбман, А.В. Ляпин, И.М. Маркова</i>	<b><u>103</u></b>
<b>Физическое моделирование взаимодействия волнения с проектируемыми берегоукрепительными сооружениями Имеретинской низменности</b> <i>Р.М. Тлявлин, Г.В. Тлявлиная, С.Ю. Дроботько</i>	<b><u>112</u></b>
<b>Математическое моделирование трансформации волн расчетных штормов с учетом влияния подводных каньонов</b> <i>В.М. Шахин, Т.В. Шахина</i>	<b><u>117</u></b>
<b>Динамика береговой зоны Имеретинской низменности</b> <i>Н.А. Ярославцев, В.А. Петров, А.П. Кириленко</i>	<b><u>126</u></b>

# ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ МОРСКИХ ВОЛНЕНИЙ И ТЕЧЕНИЙ В ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ «ТЯЖЕЛЫХ» ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ

*А.М. Белостоцкий, С.И. Дубинский*

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», г. Москва, РОССИЯ

**АННОТАЦИЯ:** В статье рассматриваются вопросы численного моделирования волнообразования и прибрежных полей течений применительно к анализу нагружения берегозащиты Имеретинской низменности (г. Сочи) в условиях размыва с использованием "тяжелых" пакетов программ гидрогазодинамических расчетов класса ANSYS CFD и ANSYS AUTODYN

**Ключевые слова:** математическое моделирование, численные методы, волновые нагрузки, берегозащита, гидрогазодинамика, программные комплексы

## VALIDATION OF THE SEA WAVE AND FLOWFIELD MODELS IN JUSTIFICATION OF "HEAVY" COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS PACKAGES

*Alexander M. Belostotsky, Sergey I. Dubinsky*

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, RUSSIA

**ABSTRACT:** In this paper, numerical simulation of wave fields and coastal currents applied to the analysis of loading coastal bank protection of Imereti Valley (Sochi) in terms of erosion using of the software package ANSYS CFD and ANSYS AUTODYN.

**Key words:** modeling, numerical methods, wave loads, coastal bank protection, CFD, program packages

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для условий проектирования берегозащиты береговой зоны Имеретинской низменности не пригодны методы расчета характеристик волн из СНиП 2.06.04-82, также как недостаточно обоснованные их вариации, которые применялись в проекте «Инженерная защита территории Имеретинской низменности». Для таких условий не применимы также упрощенные интегральные оценки переноса наносов и эволюции берега. Упрощенный подход к оценке береговых процессов для площадки проектирования может приводить к авариям портовых и берегозащитных сооружений, как уже неоднократно случилось на этом участке.

В последние годы в мировой практике береговой гидротехники получило широкое распространение использование для технических обоснований проектов морской берегозащиты и гидротехники комплексов математических численных моделей, позволяющих рассчитывать эффективность таких сооружений в условиях высокой неоднородности гидродинамических и литодинамических процессов. К сожалению, специализированные программные комплексы (в частности, MIKE) реализованы только на ПК, что не позволяет эффективно проводить расчеты сложных трехмерных задач с требуемой практикам скоростью.

Универсальные программные комплексы ANSYS/CFD (CFX + Fluent) и

ANSYS/AUTODYN допускают использование многопроцессорных параллельных вычислений на кластерных машинах, что позволяет моделировать задачи существенно большей размерности. Вместе с тем, для практического использования необходимы как их адаптация к данному типу задач с созданием специализированного интерфейса, так и верификация на представительном наборе тестов.

Основные положения и структура методики расчета ветровых воздействий, изложенной и верифицированной в [6], применимы и к данному классу задач. Приведем здесь принципиальные отличия.

Решение проводится, как правило, в нестационарной постановке. Особое внимание следует уделить генерации устойчивого входного воздействия. Решение проводится в двухфазной постановке с необходимостью специального разрешения зоны волнообразования. При моделировании процесса размыва необходим учет третьей фазы (переносимого грунта), с назначением ей эквивалентных характеристик пористости, плотности и т.п., что на порядок усложняет решение и без того не слишком простых с зрения практических расчетов задач и принципиально увеличивает их трудоемкость (практически исключая успешное решение без применения высокопроизводительных кластеров).

Важно понимать, что для практического применения вычисленных волновых нагрузок необходима организация передачи сохраненных (обычно в текстовом формате) значений давлений в узлах аэродинамической сетки на границе конструкции в прочностной комплекс, где давления должны быть приложены (интерполированы) как нагрузка в узлы соответствующей сетки.

В этой связи разумным представляется применение связанных междисциплинарных постановок и использование программ, моделирующих как поведение жидкости и газа, так и поведение конструкций в физически и

геометрически нелинейной постановке, с возможностью учета ее разрушения.

Активно развивающаяся технология SPH (Smoothed Particles Hydrodynamics, метод сглаженных частиц), логично приложимая к течениям со свободными границами и брызгообразованием, требует применения программ класса AUTODYN и LS-DYNA, реализующих явную схему интегрирования, плохо подходящую для процессов длительностью, превышающей секунды.

В этих условиях необходимо искать компромиссы и определить программы, позволяющие решать эти задачи с практической точностью, воспроизведя качественную картину, наблюдающуюся в экспериментах и на натуре.

Планируется выполнить верификацию программ согласно требованиям РААСН, аналогичную проведенным с участием авторов статьи для пакетов прочностных расчетов.

## 2. ВЫБОР ВЕРИФИКАЦИОННЫХ ЗАДАЧ

В качестве наиболее авторитетного источника задач выбран проект SPHeric, поддерживаемый университетом Манчестера. Используются также и иные источники.

Приведем краткое описание задач. Полные ссылки и информацию о проводимых расчетах можно получить у авторов.

Специалистами Инженерного Корпуса Армии США рассмотрена задача гидравлического прыжка Прямоугольный уступ, показанный на рис. 1, ранее изучали Rajaratnam и Chamani (1995), при различных величинах отношения критической глубины  $Y_c$  к высоте  $H$  в диапазоне от 0.06 до 0.35.

Испанскими и итальянскими специалистами рассматривались экспериментально нагружение тел, аналогичное прорыву дамбы (рис. 2-4) в двумерной и трехмерной постановках.

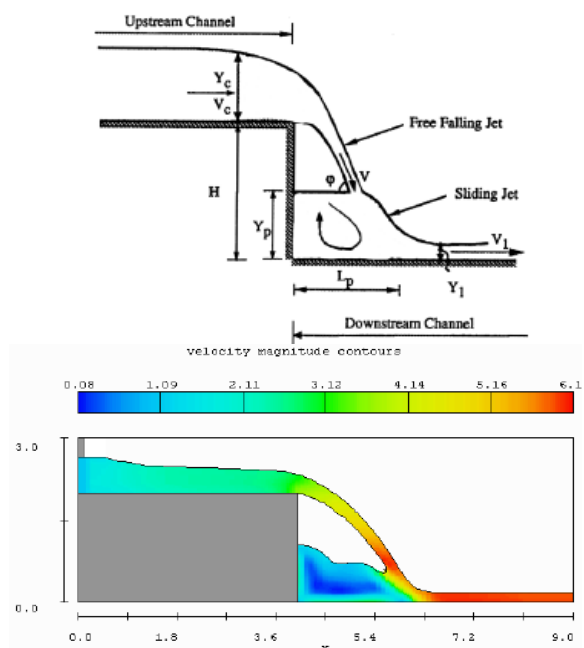


Рис. 1. Схема гидравлического прыжка и решение (flow3d)

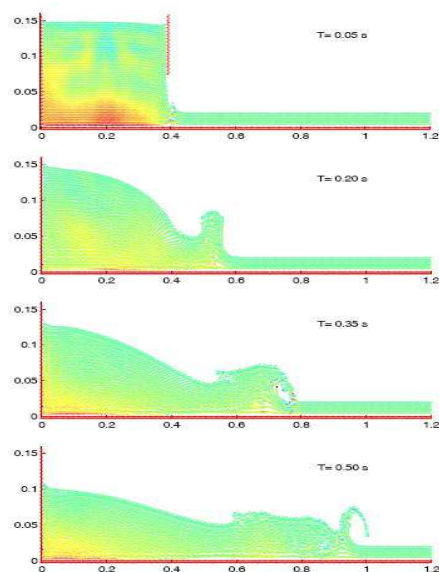


Рис. 2. Высвобождение столба воды

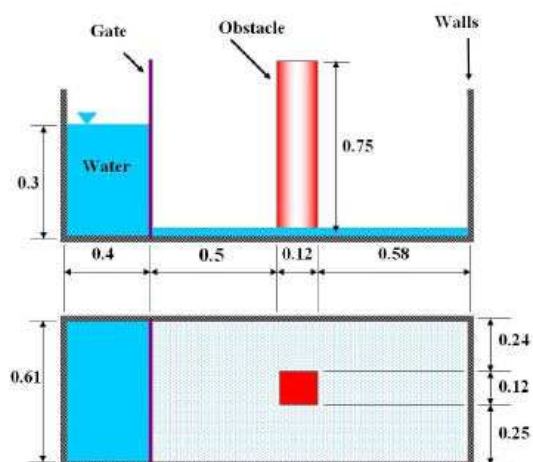


Рис.3. Нагружение призмы внезапным потоком воды

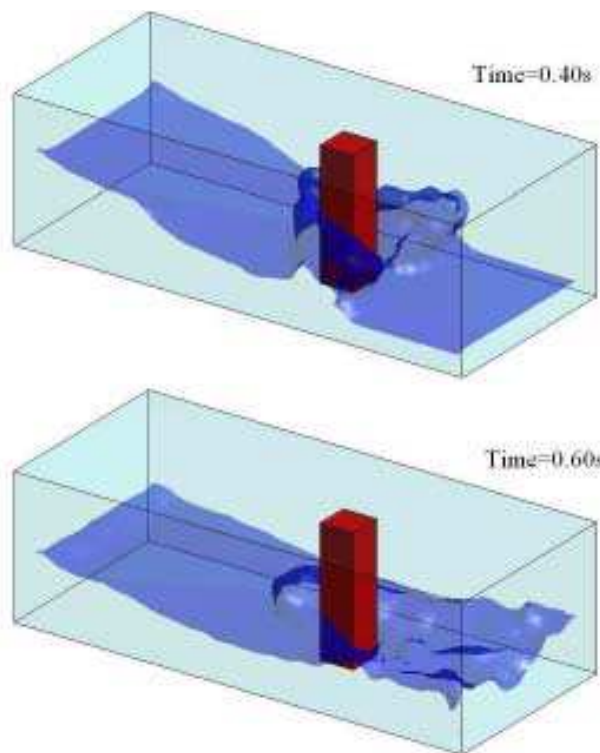


Рис.4. Нагружение призмы внезапным потоком воды. Результаты моделирования

Бельгийскими специалистами рассмотрено взаимодействие волны с треугольным препятствием (рис. 5). Испанские ученые изучали волнообразование в лотке при качке (рис. 6), как аналог поведению сжиженного газа при его транспортировке. На рис. 7 показана схема эксперимента французских ученых по размыву грунта при сбросе воды, а на рис. 8-9 по анализу волновых нагрузок на береговое сооружение.

Особый интерес представляет задача по сходу оползня (рис. 10-11), изучавшаяся группой швейцарских и английских специалистов.

Разумеется, список задач может быть дополнен, и авторы будут рады рассмотреть конкретные предложения.

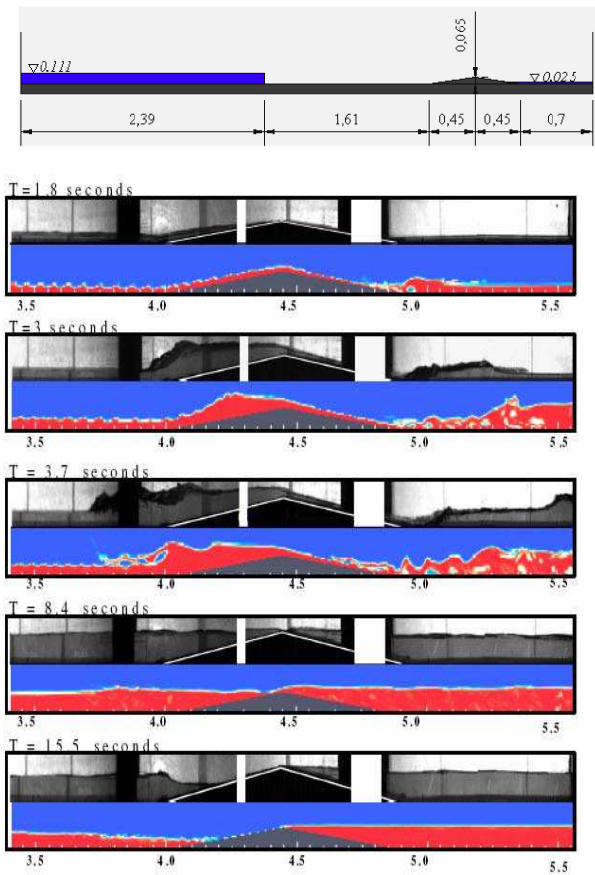


Рис.5. Взаимодействие волн с треугольным препятствием

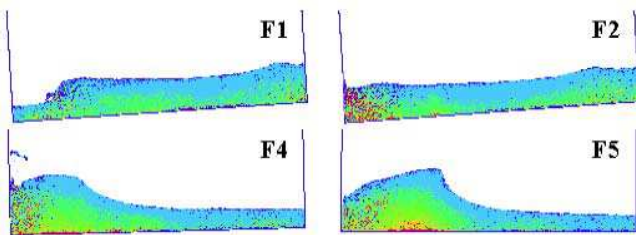


Рис.6. Волнообразование в лотке при качке

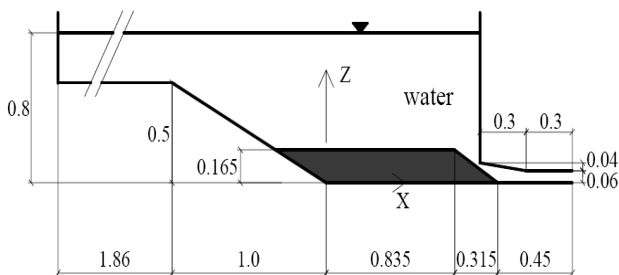
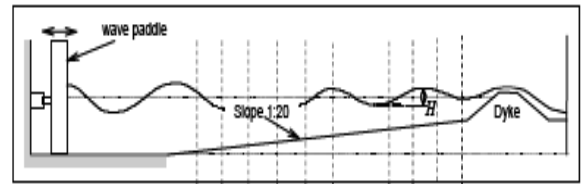


Рис.7. Размыв грунта потоком воды



Measurement points → P1 P2 P3 P4 P5 P6 P8 P10 P9 P11

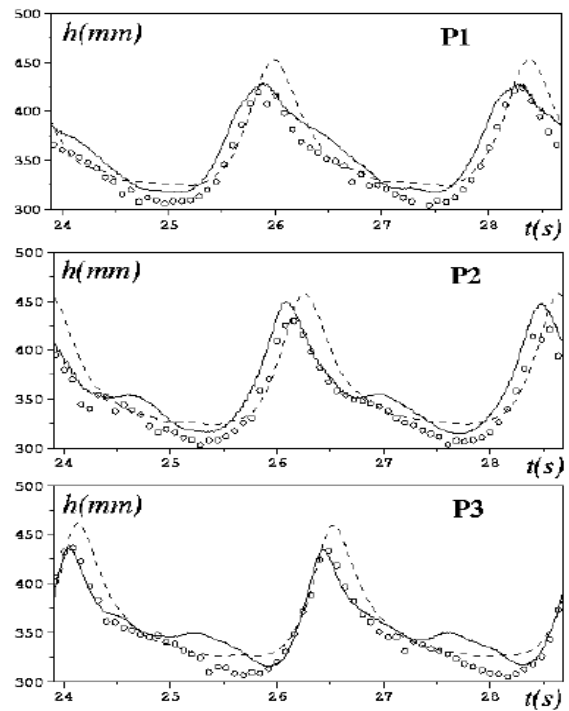


Рис.8. Набегание волны

**Замечание.**

Исследования проводились в рамках Гранта НШ-8684.2010.8 Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации «Многоуровневые численные, аналитические и экспериментальные методы исследования прочности зданий и сооружений с учетом конструктивных и физических особенностей» на 2010-2011 гг.

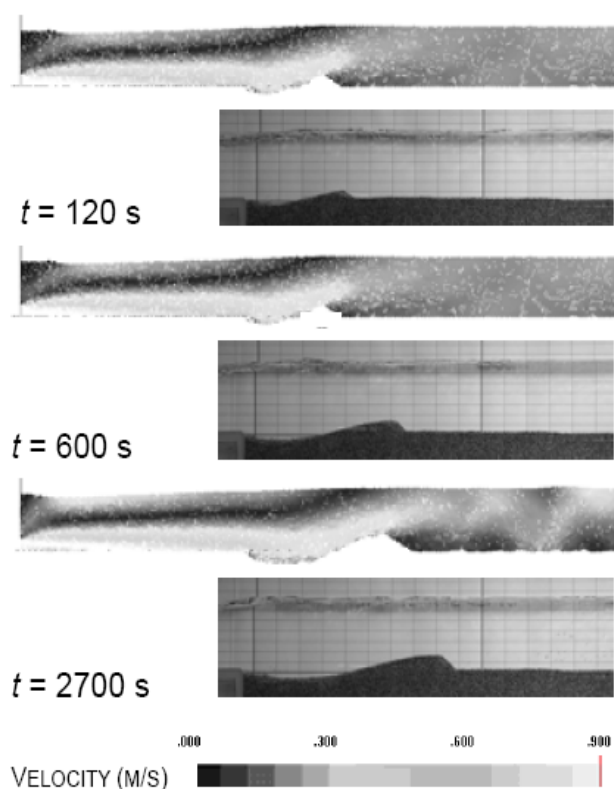


Рис.9. Размыв грунта. Расчет и эксперимент

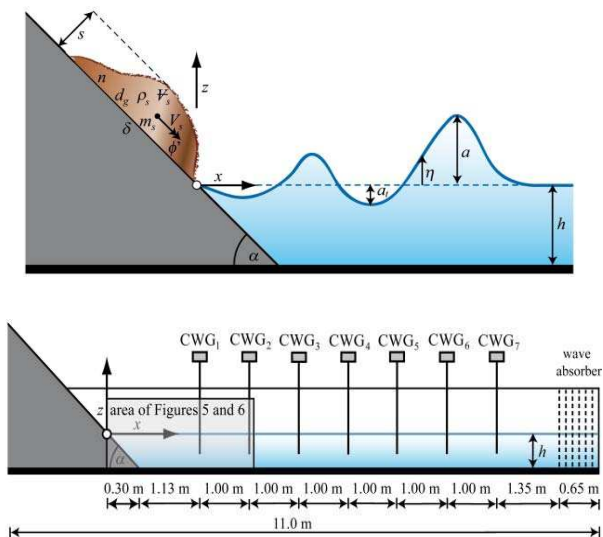


Рис.10. Волнообразование при сходе оползня. Схема эксперимента

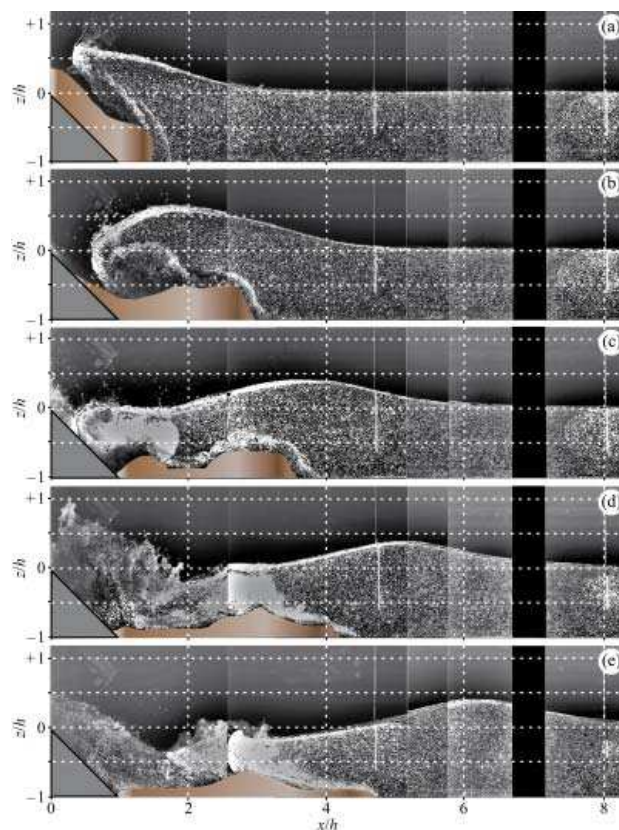


Рис.11. Волнообразование при сходе оползня. Расчет и эксперимент

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И. Некоторые аспекты верификации программных средств численного моделирования конструкций и сооружений. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering Volume 4, Issue 2. 2008, с. 30.
2. Инженерная защита территории Имеретинской низменности (включая проектно-изыскательские работы). 2 этап. Берегоукрепление. Том 3. Книга 2. Математическое моделирование берегозащитных мероприятий на побережье Имеретинской низменности. Москва, 2009.
3. СНиП 2.06.04-82\*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) Госстрой СССР - Минстрой России - М.: ГИ ЦПП, 1995.

4. **Лаппо Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К.** Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. - М., 1990.
5. **Гордеев В.Н., Лантух-Лященко А.И., Пашинский В.А., Перельмутер А.В., Пичугин С.Ф.** Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. – М.: Издательство АСВ, 2007. – 676 с.
6. **Дубинский С.И.** Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы. Дисс. на соискание ученой степени к.т.н. М., МГСУ, 2010.
7. ANSYS CFX 12.1. User's Guide. Canonsburg, 2009.
8. ANSYS FLUENT 12.1. User's Guide. Canonsburg, 2009.
9. ANSYS AUTODYN 13.0. User's Guide. Canonsburg, 2011.
10. ANSYS APDL 12.1 User's Guide. Canonsburg, 2009.

---

Белостоцкий Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор, генеральный директор ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО» (ЗАО НИЦ «СтаДиО»), директор Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов (НОЦ КМ) ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; тел/факс: +7 (495) 737-40-81, +7 (499) 257-77-61;  
E-mail: stadyo@stadyo.ru, niccm@mgsu.ru

Дубинский Сергей Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов (НОЦ КМ) ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; тел/факс: +7 (499) 929-50-17;  
E-mail: sergdubpodlipki@mail.ru, niccm@mgsu.ru

# НЕЛИНЕЙНОЕ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ БЕРЕГОЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ИМЕРЕТИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ С УЧЕТОМ ФАКТИЧЕСКИХ И ПРОГНОЗИРУЕМЫХ ДЕФОРМАЦИЙ БЕРЕГОВОГО ОТКОСА

*А.М. Белостоцкий, С.И. Дубинский*

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», г. Москва, РОССИЯ

**АННОТАЦИЯ:** В статье рассматривается численное моделирование нелинейного поведения откосов берегозащиты Имеретинской низменности (г. Сочи) в условиях размыва при укреплении проницаемыми блоками с использованием метода конечных элементов в реализации универсального комплекса программ ANSYS.

**Ключевые слова:** моделирование, численные методы, устойчивость сооружений, берегозащита, механика грунтов

## NONLINEAR FINITE ELEMENT SIMULATION OF STABILITY OF COASTAL BANK PROTECTION STRUCTURES OF IMERETINSKY LOWLAND TAKING INTO ACCOUNT ACTUAL AND PROGNOSSED COASTAL SLOPE DEFORMATIONS

*Alexander M. Belostotsky, Sergey I. Dubinsky*

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, RUSSIA

**ABSTRACT:** We consider the nonlinear numerical simulation of the erosional behavior of slopes in coastal bank protection structures of Imeretinsky Lowland (Sochi, Russia) while strengthening the permeable blocks, using the finite element method in the implementation of the software package ANSYS.

**Key words:** modeling, numerical methods, stability of structures, coastal bank protection, soil mechanics

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для рассматриваемого участка побережья с сильнейшим на Черном море активным разрушительным воздействием штормов предложены неразмываемые защитные конструкции, которые рассчитаны на усиление штормовых нагрузок при прогнозируемом сокращении ширины пляжа. Для защиты дамб и сохранения рекреационной зоны в условиях дефицита твердого стока реки Мзымта необходимо дополнительное укрепление мористого откоса дамбы и ее основания и регу-

лярные отсыпки гравийно-галечного материала с малой примесью глинистых частиц. Темпы разрушения берега требуют неотложных мероприятий по его укреплению. В процессе проектирования рассматривались три варианта укрепления откоса (каменная наброска, железобетонные плиты, проницаемые блоки). В статье проведены расчетные исследования для наиболее актуального, третьего варианта. При этом рассмотрена общая устойчивость наиболее потенциально опасного участка откоса для определения предельной величины размыва (в запас). Вы-

полнялась оценка поведения грунта в условиях малого (и приближенно определяемого) сцепления.

## 1. ОПИСАНИЕ СООРУЖЕНИЯ

Согласно задания на проектирование, выданного ГК «Олимпстрой», проектируемое берегозащитное сооружение расположено в береговой зоне Имеретинской низменности на участке от р. Мзымта до границ грузового порта в районе р. Псоу и имеет общую протяженность 5 км. На участке строительства грузового порта, расположенного в устье р. Мзымта, берегозащитное сооружение проектом не предусматривается. По оси проектируемого берегоукрепительного сооружения разбит пикетаж с началом в устье р.Мзымты. Расчетная отметка верха защитной дамбы составляет 4,5 м. Верхняя зона дамбы шириной 5,0 м. крепится монолитными железобетонными плитами с размерами 5.0\*6.0\*0.2м. и оформляется как прогулочная терраса с парапетным ограждением.

С отм. 4.5 м до отм. 2.5 м. откос пляжа принят с заложением 1:5 и крепится сборными железобетонными блоками с размерами 1.0\*1.0\*1.0 м проницаемого типа.

В основании проницаемого откоса предусматривается упорный пояс, состоящий из монолитного железобетонного ростверка и буронабивных свай диаметром 720 мм и длины 6.0м., погружаемых с шагом 2.0м.

Согласно результатам анализа [1] самыми уязвимыми являются участки берега в районах ПК 18 и ПК 28, где береговые склоны обрываются в каньоны. При штормовых воздействиях значительные объемы наносов смываются с пляжа, перемещаются вниз и безвозвратно теряются. Возможная величина размыва по оценкам достигает 110 см.

На остальных участках условия в целом более благоприятны и не вызывают опасений. На профилях ПК 22, 32 и 41 штормовые размывы в целом не превышают 40 см. На профиле ПК 30 подводный склон может размываться на значительную глубину, но пляж при этом нарастает.

на значительную глубину, но пляж при этом нарастает.

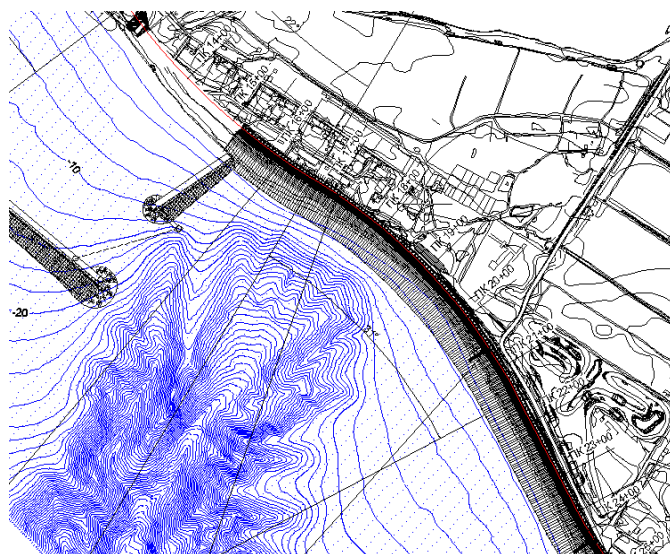


Рис. 1. Положение отметок ПК16-ПК24

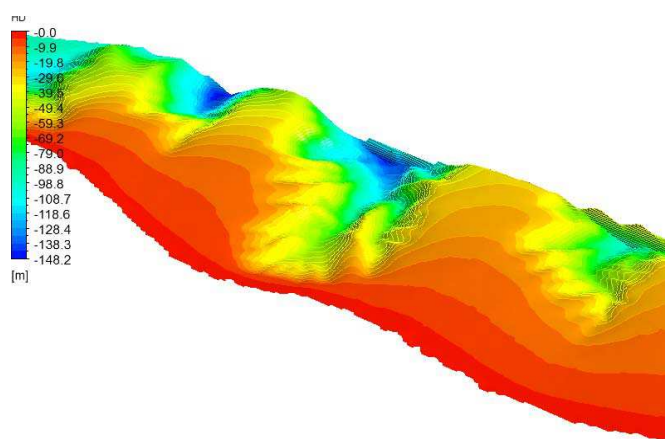


Рис. 2. Карта глубин в окрестности порта

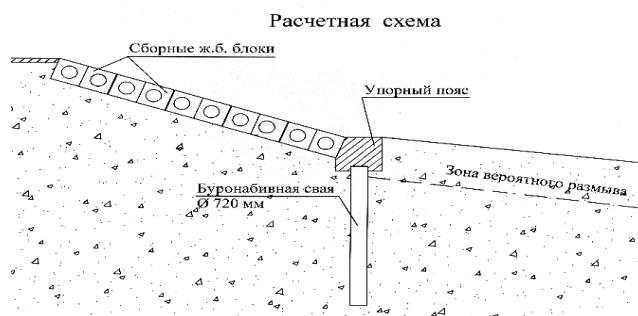


Рис. 3. Упрощенная расчетная схема укрепления проницаемыми блоками



ловиях с учетом многообразия и неоднородности механических свойств материалов и условий нагружения. Для настоящих расчетных исследований использован лицензионный программный комплекс ANSYS (версия 12.1), реализующий МКЭ в перемещениях и установленный в Научно-образовательном центре компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов МГСУ.

Программный комплекс сертифицирован Госатомнадзором РФ (рег. номер ПС в ЦО-ЭП при РНЦ КИ №490 от 10.09.2002, рег. номер паспорта аттестации №145 от 31.10.2002), а также многими зарубежными органами сертификации (ISO-9001, ISO 9000-3, British standard BS 5750, Lloyd's Register's software certification, NAFEMS QA certification и др.).

Под руководством и при участии авторов проведена верификация программного комплекса ANSYS Mechanical согласно требованиям Российской академии архитектуры и строительных наук (свидетельство РААСН №02/ANSYS/2009).

ANSYS допускает приложение нагрузок всех видов и позволяет включать основные виды нелинейности (пластичность, ползучесть, трещинообразование в бетоне и металле и т.д., большие деформации и смещения, контакт с трением), в том числе и в нестационарной динамической постановке. Возможен расчет температурных полей и мн. др. (см. [2-8])

Применительно к решению задач устойчивости берегозащитных сооружений программа обладает целым рядом особых процедур и возможностей, необходимых для успешного проведения моделирования геомеханических процессов: большая библиотека разнообразных контактных конечных элементов, моделирующих локализацию сдвиговых деформаций вплоть до моделирования дискретной среды с контактным трением; процедуры «рождения и смерти» элементов; изменение свойств элементов в процессе счета; мультифизичность, когда на одной конечно-

элементной модели решаются задачи для различных процессов; совместный учет грунта и конструкции в нелинейной постановке. внутреннее трение и корректные законы прочности; процессы упрочнения и разупрочнения; зависимость деформаций грунта от времени; описание процессов нагрузки, разгрузки и повторного нагружения; дилатансия и другие «перекрестные» эффекты. Эти нелинейные свойства позволяют описать зависимость деформаций грунта от траектории нагружения, что суммирует вышеуказанные эффекты нелинейного поведения грунтов. Необходимо отметить, что адекватный анализ возможен лишь при определении всех необходимых параметров и опций из натуральных экспериментов.

Основная модель поведения грунта в ANSYS – модель Друкера-Прагера, применяющая коническую аппроксимацию поверхности разрушения. Возможное применение более сложных моделей (как правило, учитывающих упрочнение) требует дополнительного ввода большого числа параметров, не регламентируемых СНиП и определяемых только по результатам специально организованных экспериментов.

#### 4. ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ КЭ-МОДЕЛИ

Рассматривалось типовое сечение ПК18. Решение выполнялось в плоской квазидвумерной постановке (один элемент по толщине). Наложены необходимые граничные условия симметрии на границах расчетной области. Подобная схема позволяет наиболее гибко перейти при необходимости к полной трехмерной постановке. Всего в модели примерно 7 тысяч восьмиузловых элементов *SOLID45* и 13 тысяч узлов.

Учтено контактное взаимодействие между плитой и щебнем, между кубами и щебнем, между щебнем и опорой, между опорой и подсыпкой, между сваей и основным грунтом и т.п. Коэффициент контактного трения принят равным 0.25, как для обводненных

грунтов. Для улучшения сходимости и без заметного влияния на итоговые результаты между опорой и проницаемыми кубами введен слой щебня толщиной 10 см.

Бетон принят с модулем 3000 МПа, для щебня принималось физически линейное поведение с модулем упругости 70 МПа. Сетка была уточнена по результатам вычислительных экспериментов.

Характеристики грунта приняты равными 30 МПа (модуль деформации) и  $26^{\circ}$  (угол внутреннего трения). Начальный модуль упругости принят с повышающим коэффициентом 4 к модулю деформации. Существенного влияния величина повышающего коэффициента в рассматриваемом диапазоне нагрузок не оказала. Для улучшения сходимости также учтена дилатансия грунта (принята равной  $2^{\circ}$  по результатам вычислительных экспериментов). Для грунта обратной засыпки принят модуль деформации равным модулю упругости 10 МПа, угол внутреннего трения равен  $26^{\circ}$ . Дилатансия принята равной  $1^{\circ}$ . Форма котлована для обратной засыпки весьма различна для сечений пляжа и для некоторых участков вообще не производится. Для собственно подсыпки пляжа модуль упругости принят равным 30 МПа. Нелинейные пластические свойства и его разрушение под действием внешних факторов для упрощения расчета не рассматривались.

Свая моделировалась упрощенно в квазидвумерной постановке, исходя из относительно частой их установки и из практических соображений (для уменьшения размера расчетной модели) с уменьшением модуля упругости на величину, соответствующую реальному ее объему. При шаге  $L=2$  м и диаметре сваи  $d=0.72$  м коэффициент уменьшения составил  $3.14*d^2/(4*L*d) = 0.28$ . Модули упругости сваи и ростверка приняты равными  $3*10^6$  тс/м<sup>2</sup>. Решение проводилось в физически и геометрически нелинейной постановке с учетом поэтапности приложения нагрузки и вымыва грунта.

На первом этапе расчет проводился от собственного веса грунта, далее учитывался вес

бетонных элементов, далее с сохранением напряжений перемещения обнулялись. На следующих этапах насыпной грунт пляжа удалялся из расчетной схемы параллельными слоями по 10 см. Учет реальной формы выемки (вдали от опоры) может быть произведен на следующих этапах, но, вероятнее всего, не окажет принципиального влияния на результаты.

Расчетная процедура была организована с использованием языка пользовательского программирования ANSYS APDL [8]. Решение выполнялось методом Ньютона-Рафсона в приращениях. Для улучшения сходимости итерационного процесса были активированы процедуры прогноза-коррекции и ряд специальных опций. С учетом высокой нелинейности контактного взаимодействия в условиях значительных зон пластического разрушения грунта применялась несимметричная схема хранения и решения матрицы жесткости модели. Сравнительные расчеты в квазидвумерной и трехмерной схеме моделирования сваи показали практическую идентичность результатов при уменьшении времени счета примерно на 50% вследствие улучшения сходимости.

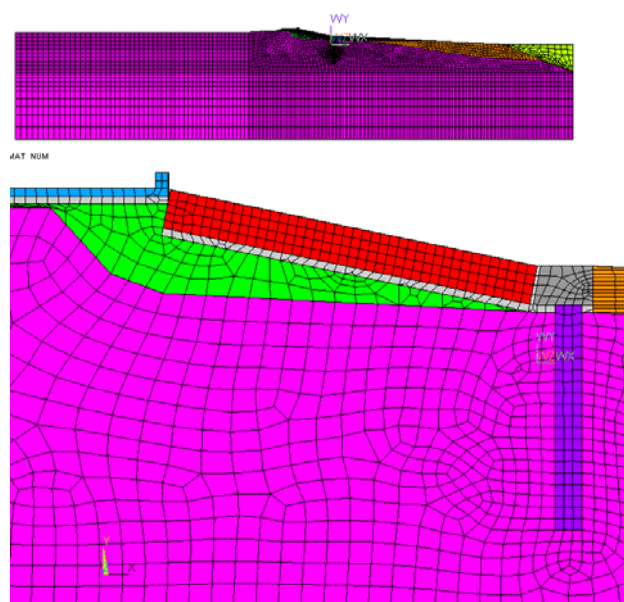


Рис. 7. Основная расчетная КЭ-модель

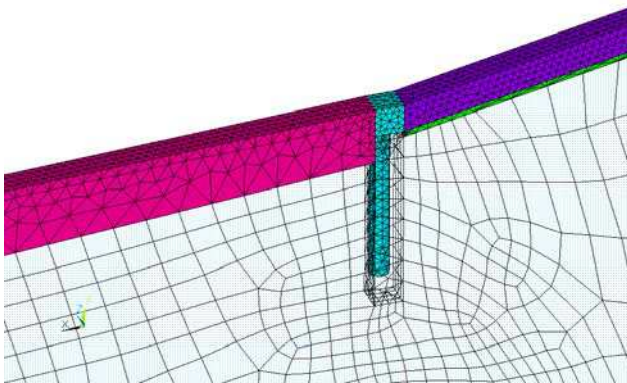


Рис. 8. Вариант КЭ-модели с уточненным моделированием сваи

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Основные результаты выполненных расчетных исследований представлены на рис. 9-12.

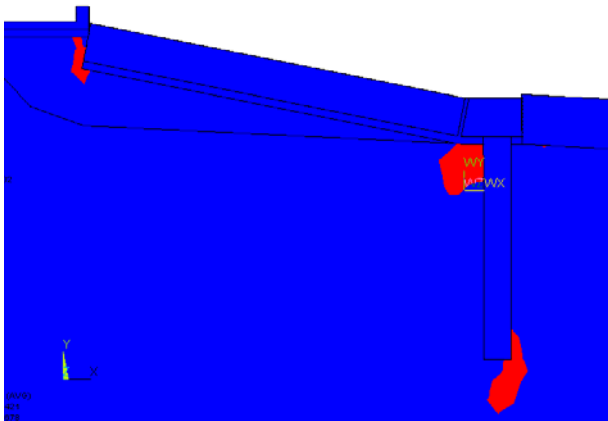


Рис. 9. Зоны развитой пластичности (эквивалентные деформации 0.10 и выше) при сцеплении грунта 0.7 кПа и 0.8 кПа.

Расчеты проводились последовательно при уменьшении материала сцепления грунта от 1 кПа (нормативно рекомендуемая величина для крупного песка) и ниже.

Контрольные расчеты при уменьшенном в пять раз модуле упругости материала сваи (на случай возможного ее дефекта), а также при уменьшенном угле внутреннего трения с 26 до 22 градусов не привели к существенному изменению получаемых результатов.

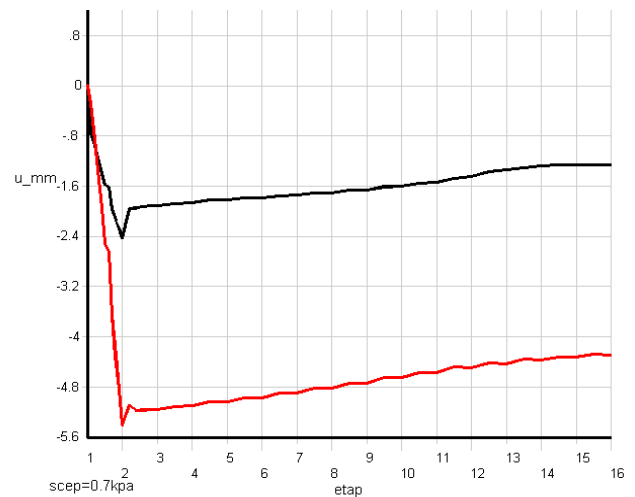
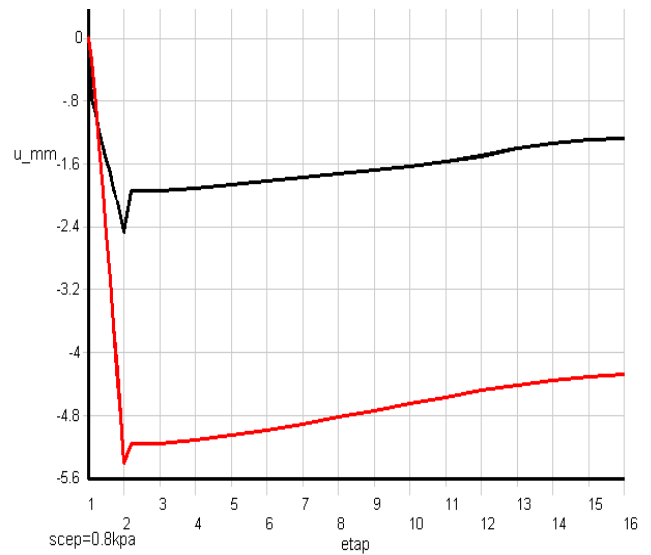


Рис. 10. Зависимости перемещений вершины опоры (черная линия – горизонтальные, красная линия – вертикальные) при различных этапах нагружения для сцепления грунта 0.7 кПа и 0.8 кПа.

Этап 2 соответствует приложению нагрузки  $5 \text{ тс/м}^2$  к поверхности проницаемых блоков, этап 3 – выемке 10 см грунта, этап 4 – выемке 20 см, и т.д.

## 6. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Рассмотрена задача устойчивости сечения откоса ПК18 строящихся берегозащитных сооружений Имеретинской низм., для которого реализуется максимальный размыв (по оценкам до 110 см).

Нелинейное конечноэлементное моделирование устойчивости берегозащитных сооружений Имеретинской низменности с учетом фактических и прогнозируемых деформаций берегового откоса

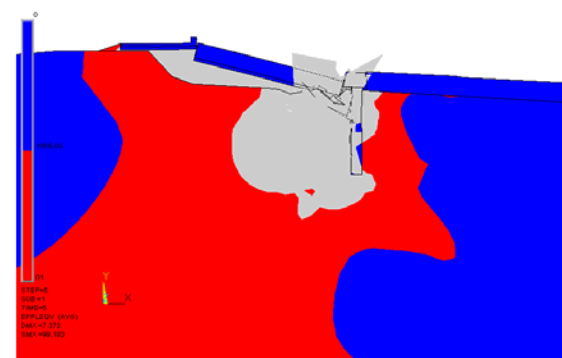
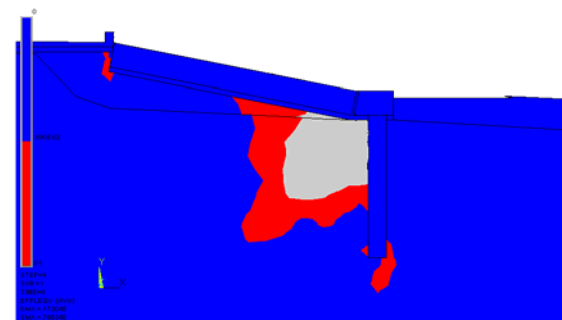
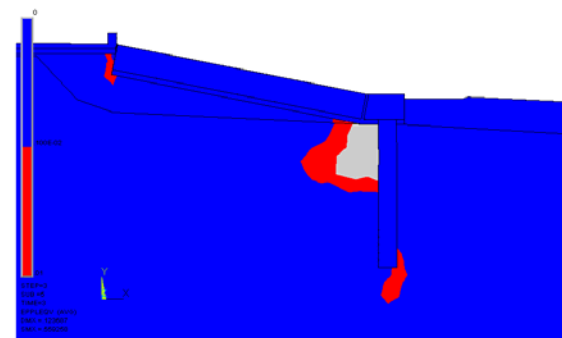
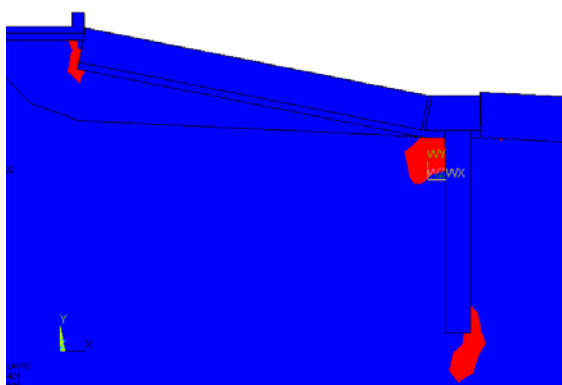


Рис. 11. Зоны развитой пластичности (эквивалентные деформации 0.10 и выше) при сцеплении грунта 0.6 кПа после размыва 0,10, 20 и 30 см грунта, соответственно. Несошедшееся решение показано условно. Проницаемые блоки теряют устойчивость на откосе

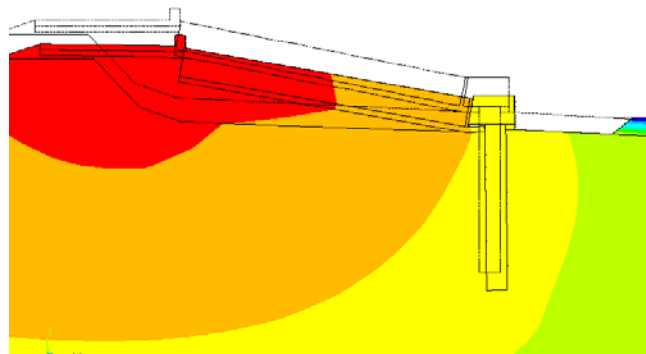


Рис. 12. Схема осадок для сошедшихся решений. Масштаб увеличен

Как показали расчетные исследования, выполненные в физически и конструктивно нелинейной конечноэлементной постановке по программному комплексу ANSYS, устойчивость откоса при размыве обеспечивается только при сцеплении основного грунта, большем 0.5 кПа.

При принятом сцеплении основного грунта 0.6 кПа предельная нагрузка на проницаемые блоки составляет примерно  $4.7 \text{ тс/м}^2$ , что немногим меньше величины, рекомендуемой нормами ( $5 \text{ тс/м}^2$ ). При сцеплении основного грунта 0.7 кПа предельная нагрузка по расчету ANSYS превышает  $7 \text{ тс/м}^2$ .

Следует также отметить, что в условиях геостатического сжатия гравийный грунт на глубине неизбежно приобретает некоторое сцепление. Его величину, равно как и другие параметры, возможно определить только из натуральных экспериментов и (желательно) трехосных испытаний. Предоставленной информации по грунтам недостаточно, чтобы дать необходимые гарантии. Реальное сцепление с учетом обводнения также может принимать значения в широком диапазоне.

В зонах ПК18 и ПК28 желательны дополнительные мероприятия по берегозащите (в частности, стены в грунте и добавление связующих в проблемные участки). Оценка эффективности этих и подобных мероприятий может быть проведена на трехмерной модели участка побережья с детальным представле-

нием рельефа и профиля подсыпки при уточненных величинах размыва с использованием отработанной методики численного моделирования, представленной в данной статье.

#### **Замечание.**

Исследования проводились в рамках Гранта НШ-8684.2010.8 Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации «Многоуровневые численные, аналитические и экспериментальные методы исследования прочности зданий и сооружений с учетом конструктивных и физических особенностей» на 2010-2011 гг.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Леонтьев И.О.** Оценка устойчивости пляжей и влияния порта на литодинамические процессы в береговой зоне Иммертинской низменности. Технический отчет. Москва, 2011.
2. **Белостоцкий А.М., Дубинский С.И.** Некоторые аспекты верификации программных средств численного моделирования конструкций и сооружений. // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering* Volume 4, Issue 2. 2008, с. 30.
3. **Белостоцкий А.М., Дубинский С.И.** Анализ причин обрушения конструкций покрытия СОК «Трансвааль-парк». // ANSYS Solutions. Русская редакция. – Зима 2007, с. 5-12.
4. **Белостоцкий А.М., Дубинский С.И., Каличава Д.К., Пеньковой С.Б., Аул А.А., Козырев О.А., Орехов В.В.** Суперэлементное моделирование НДС системы «грунтовое основание-здание» высотных многофункциональных комплексов. // «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы». Сб. трудов международной научно-практической конференции. М.: МГСУ, 2008, с. 233-243.
5. **Дубинский С.И.** ANSYS и ANSYS/CivilFEM в строительстве. // САПР и графика. № 12, 2004, с. 75–77.
6. ANSYS Theory 12.1. User's Guide. Canonsburg, 2009.
7. ANSYS APDL 12.1 User's Guide. Canonsburg, 2009.

---

Белостоцкий Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор, генеральный директор ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО» (ЗАО НИЦ «СтаДиО»), директор Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов (НОЦ КМ) ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; тел/факс: +7 (495) 737-40-81, +7 (499) 257-77-61; E-mail: stadyo@stadyo.ru, niccm@mgsu.ru

Дубинский Сергей Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов (НОЦ КМ) ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; тел/факс: +7 (499) 929-50-17; E-mail: sergdubpodlipki@mail.ru, niccm@mgsu.ru

# ПРОГНОЗ ВЕТРОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ЗОНЕ БОЛЬШОГО СОЧИ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧ АЭРОДИНАМИКИ

*А.М. Белостоцкий, С.И. Дубинский*

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», г. Москва, РОССИЯ

**АННОТАЦИЯ:** В статье рассматриваются вопросы трехмерного численного моделирования ветровых режимов Имеретинской низменности, г.Сочи и п. Адлер с использованием разработанного программного модуля для пакета программ ANSYS/CFD. Разработанная методика расчета ветровых воздействий на высотные здания и большепролетные сооружения продемонстрирована на примере определения нагрузок на фасадные конструкции строящегося железнодорожного вокзала в Адлере.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, численные методы, ветровые нагрузки, вычислительная гидрогазодинамика

## WIND EXITATION FORECAST FOR "BIG SOCHI" REGION BASED ON NUMERICAL SIMULATION OF AERODYNAMICS

*Alexander M. Belostotsky, Sergey I. Dubinsky*

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, RUSSIA

**ABSTRACT:** 3D numerical simulation of wind fields for Imereti lowland, Sochi and Adler using the developed software modules for the software package ANSYS/CFD is discussed. A technique for calculation of wind loads on tall buildings and large-span on the example of facade constructions being built railway station in Adler is described.

**Key words:** mathematic simulation, numerical methods, wind velocities&loads, CFD

### 1. ВЕТРОВЫЕ РЕЖИМЫ СОЧИНСКОГО РЕГИОНА

Проектирование олимпийских сооружений прибрежного и горного кластеров и транспортной инфраструктуры требует, в том числе, и уточненной оценки ветровых режимов и воздействий для зоны Большого Сочи (в частности, и Имеретинской низменности). Согласно СП 2.01.07-85 [2] и ТСН Краснодарского края [3] для г. Сочи предлагается принимать третий ветровой район и тип местности А. Но, учитывая большую площадь города, правильнее говорить об обоснованном ветровом районировании. Следует также отметить уменьшение числа метеостанций в последние 10-20 лет, причем метеонаблюдения

нередко не учитывают специфику расчетов ветрового нагружения, ориентируясь на средние, а не на экстремальные значения, обращая основное внимание на замеры температур и влажности. Применяющееся на практике оборудование не рассчитано на замеры скоростей ветра, превышающих 30 м/с. Метеостанции находятся в экранированных от ветра зонах.

В этой связи возрастает актуальность натуральных замеров скоростей ветра и профилей не (с применением наиболее современного оборудования, в частности, содаров и лидаров) непосредственно на площадке строительства. Приведем для справки основные сведения о климатических и ветровых режимах зоны строительства.

Важную роль в формировании климата курорта Сочи играет рельеф. В районе Сочи горы, амфитеатром спускаясь к морю, окружают территорию курорта с северо-востока, востока, юго-востока, ограждая зимой прибрежную полосу от холодных северных и восточных ветров.

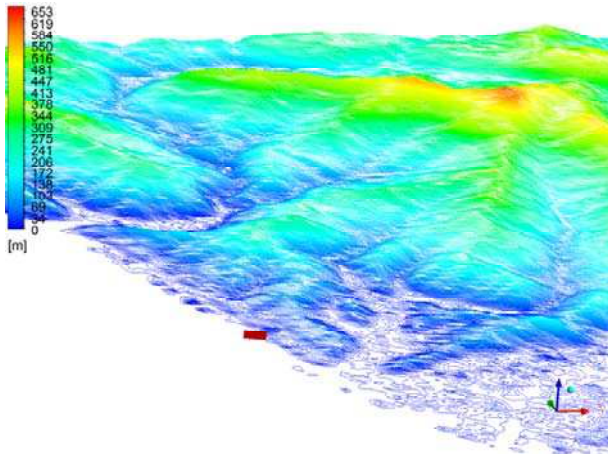


Рис. 1 Физическая карта окрестностей п. Адлер по данным Shuttle Radar Topography Mission (радиус 7 км. Зона вокзала помечена красным).

Природные условия прибрежной полосы г. Сочи, согласно СНиП 2.01.07-85, относятся к южному району. Формированию мягкого субтропического климата способствуют горные хребты Кавказа, которые препятствуют прохождению на юг холодного воздуха с севера, а также Черное море, являющееся компенсатором сезонных перепадов температуры и влажности воздуха.

На территории Кавказа наблюдаются почти все известные типы местной циркуляции: фёны различного происхождения, горно-долинная циркуляция, склоновые ветры, бризы, а также различные ветры, усиливающиеся на отдельных участках. Ветровой режим складывается в результате совместного действия географических и циркуляционных факторов.

В районе олимпийского строительства наибольшие значения средних месячных скоростей ветра наблюдаются зимой с декабря по март (3.7 – 3.8 м/с), наименьшие значения приходится на июнь и сентябрь (2.9 м/с). Максимальная возможная скорость ветра редкой повторяемости достигает 40 м/с. В течение всего года наиболее часто повторяются скорости ветра 1-3 м/с. Они составляют более половины (63.3%) общего числа случаев за 1 год. На интервал скоростей ветра 1-7 м/с приходится около 91% случаев за год. Штиль отмечается сравнительно редко 8.3%, а ветер со скоростью более 8 м/с составляет менее 1% числа всех случаев за год.

Максимальные скорости юго-восточных ветров в Адлере достигали 28-30 м/с в ноябре месяце. Усиление северо-западных ветров происходит за холодным фронтом, быстро смещающимся с запада или северо-запада. Усиление северо-западного ветра обычно кратковременно, скорости достигают 10-13 м/с и только летом, при наличии кучево-дождевой облачности, они приобретают характер шквалистых.

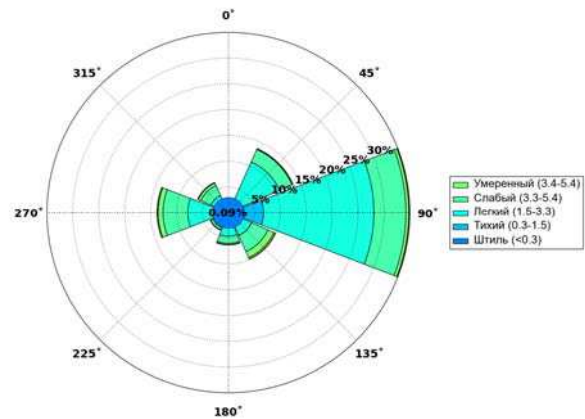


Рис. 2. Роза ветров по наблюдениям в Адлере по данным сайта [meteo.infospace.ru](http://meteo.infospace.ru) для метеостанции 37171 за период с 26 ноября 1998 по 26 ноября 2010 года.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В рамках подготовки к Зимней Олимпиаде 2014 года в Адлере началось строительство нового ж/д вокзала (конкорса) с пристроенной 4-х этажной автостоянкой и реконструкция существующего здания вокзала (г. Сочи, ул. Ленина, 125).

В дни проведения зимних Олимпийских игр-2014 года станция Адлер будет являться станцией примыкания трех направлений: Адлер - горноклиматический курорт "Альпика-Сервис", Адлер - Веселое и Адлер - аэропорт Сочи, и выполнять основные функции посадки и высадки пассажиров в пригородном и дальнем сообщении.



Рис. 3. Проект здания ж/д вокзала в Адлере

Требуется определить максимальные и минимальные расчетные значения ветровой нагрузки, используемые при проектировании элементов ограждения (фасадных конструкций), а также среднюю и пульсационную составляющие ветровой нагрузки, необходимые для расчета напряженно-деформированного состояния и оценки прочности несущих конструкций здания вокзала.

Необходимо учесть:

- объемно-планировочные решения объекта;
- характер местности и влияние близкорасположенных зданий;
- метеорологическую информацию в районе строительства.

Строящийся объект является уникальным большепролетным зданием с достаточно

сложными объемно-планировочными и конструктивными решениями, не имеющими прямых аналогов. В СП [2], а также в других отечественных и зарубежных нормативных документах и справочниках не приводятся данные о распределении ветровых нагрузок по ограждающим конструкциям зданий и сооружений подобной формы.

Аэродинамика характеризуется возможным проявлением эффекта “крыла” при некоторых направлениях ветра и сложным трехмерным характером обтекания при всех направлениях ветра.

В этой связи было принято решение о применении современных методов и программных средств численного моделирования для расчетного определения упомянутых выше критериальных параметров ветровых воздействий.

Применительно к расчету локальных минимумов и максимумов на фасадные конструкции необходимо не только более адекватно моделировать форму зданий, но и проводить расчет при представительном множестве направлений ветра, поскольку априори неизвестно, при каком из них будут реализовываться экстремальные значения локальных давлений. Для возможности оценки ресурса фасадных конструкций при этом необходимо учитывать диаграммы повторяемости ветров по силе и направлению (“розу ветров”), а также спектральный состав и частоту повторения экстремальных значений.

Подобную информацию на практике можно получить лишь в немногих из отечественных аэродинамических труб, оснащенных не только датчиками замера средних давлений, но и датчиками, определяющими изменение давлений во времени. Помимо этого, вряд ли реально заранее предугадать все места установки датчиков (обычно их не более 200-300) на комплексе зданий сложной формы и большой площади поверхности.

Весьма значительные отрицательные давления (вплоть до  $C_p = -10$ ), регулярно наблюдаемые на “натуре” [4], не были замечены при испытаниях в аэродинамических трубах

соответствующих моделей и были отмечены лишь при численном моделировании, когда информация доступна для сотен тысяч (и более) точек.

В последние годы бурно развивается вычислительная аэрогидродинамика (CFD), совершенствуются технологии расчетов на фоне неуклонно возрастающей мощности компьютеров. Ведущие зарубежные исследовательские и проектные организации все чаще комбинируют испытания и "численные" эксперименты. В перспективе роль математического моделирования, как показал опыт в смежных отраслях (например, аэрокосмической) и задачах (строительная механика), будет только возрастать.

Применение аналогичных методик, программ и современной вычислительной техники принципиально позволяет и отечественным специалистам проводить расчеты ветровых воздействий, не уступающие по сложности и практической значимости

### 3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Расчеты ветровых потоков и воздействий сводятся к численному решению трехмерных нестационарных нелинейных уравнений гидрогазодинамики в постановке Навье-Стокса. Кроме того, должны удовлетворяться уравнения неразрывности (сохранения массы) и состояния. Для упрощения моделирования ветровые потоки предполагаются несжимаемыми и изотермическими, массовые силы не учитываются.

Прямое решение уравнений Навье-Стокса с учетом вихрей всех масштабов (DNS, Direct Numerical Simulation) при современных возможностях ЭВМ практически реализуемо только для очень малых скоростей потока и чисто исследовательских задач. Поэтому, в современной расчетной практике доминирует полуэмпирический подход, основанный на разложении скорости на осредненную во времени и пульсационную составляющие  $u_i(t) = \bar{u}_i + u'_i(t)$  и переходе к решению т.н.

"осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса" (Reynolds averaged Navier-Stokes Method, RANS). Система является незамкнутой и требует дополнительных соглашений ("моделей турбулентности").

Решение уравнений может проводиться как в стационарной, так и в нестационарной постановке. Стационарная задача сводится к итерационному решению редкозаполненной системы линейных алгебраических уравнений, с узловыми давлениями, компонентами скоростей и мерами локальной турбулентности (в частности,  $TKE$ ) в качестве неизвестных. Определяются осредненные во времени величины, число которых для рассматриваемых объектов/задач может достигать сотен миллионов. Итерационный процесс решения системы проводится по связанной многосеточной схеме (coupled multigrid) и считается сошедшимся при малых относительных невязках решения системы. Для улучшения сходимости в качестве предобуславливателя используется неполное треугольное (ILU) разложение матрицы.

К сожалению, точность (и даже практическая сходимость) стационарных расчетов RANS в ситуациях с развитым вихреобразованием не всегда удовлетворительна. Проведенное представительное тестирование на широком круге практических задач (включая сравнение с данными испытаний в аэродинамических трубах) позволило определить наиболее пригодную для данного класса задач модель турбулентности. Модель SST (Shear Stress Transport, перенос сдвиговых напряжений, F.Menter, 1993), комбинируя достоинства классических моделей "k-ε" и "k-ω", обеспечивает достаточную точность результатов и эффективную сходимость итерационного процесса даже при относительно грубых сетках и умеренном разрешении пограничного слоя.

Основные положения описанной выше методики приведены в [8].

Важным аспектом решения уравнений Навье-Стокса является схема дискретизации. Наиболее эффективным в настоящее время

признан "метод конечных объемов" (МКО), не требующий столь детального моделирования пограничного слоя, как метод конечных элементов (МКЭ), и более удобный при описании сложных расчетных областей реальных застроек, чем метод конечных разностей. Современные подходы (схемы адвекции второго порядка, применение пристеночных функций и увеличение числа точек интегрирования в ячейке) значительно снижают требования к расчетной сетке и ресурсам ЭВМ.

Рекомендуемые размеры расчетной области – минимум 10 высот "господствующего" задания во всех направлениях.

В качестве характеристик набегающего потока используются профили скорости ветра и характеристик турбулентности (интенсивность и масштаб вихря), отвечающие заданным ветровым районам и типам местности по СП [2]. В качестве "внешних" граничных условий для расчетной области используются "мягкие" условия по Нейману (равенство нулю производных).

Для учета шероховатости стенок рекомендуется вместо подбора пристеночных функций или коррекции их стандартных параметров применять по возможности "натуральное" моделирование (учет в модели рельефа местности, балконов и оконных проемов и т.п.). Нестационарные расчеты RANS (Unsteady RANS, URANS) также не всегда позволяют правильно отследить срывные потоки. В этой связи наиболее активно в настоящее время развиваются "гибридные" подходы. При DES-подходе (моделировании "отсоединенных" вихрей, Detached Eddy Simulation, М.Х. Стрелец и P.R. Spalart, 1997) комбинируются LES (моделирование крупных вихрей, Large Eddy Simulation) и URANS, что позволяет во много раз уменьшить трудоемкость расчетов по сравнению с "классическим" LES. Вихри в пограничном слое и вблизи него моделируются интегрально, отсоединенные вихри предлагается моделировать детально (аналогично LES), применяя достаточное разрежение сетки.

При подходе SAS (Scalable Adaptive Simulation, Menter, Egorov, 2005) комбинируются уже DES и URANS, в процессе нестационарного расчета гибко изменяется предельный размер учитываемых вихрей.

Неявные схемы интегрирования позволяют применять временной шаг с числами Куранта  $Co \sim 2$  при условии отслеживания отклика системы. Для нестационарных расчетов необходима генерация нестационарного поля скоростей ветра со средними и спектральными характеристиками, отвечающими заданной высоте и ветровому району.

Основной характеристикой диапазона разброса экстремальных давлений на фасадные конструкции служат коэффициенты обеспеченности

Ввиду крайней трудоемкости вариантных нестационарных расчетов для минимизации их объема применяется практическая методика [25] оценки и пиковых расчетных нагрузок на фасадные конструкции ( $P^*_{max}$  и  $P^*_{min}$ ) по результатам стационарных расчетов энергии турбулентных пульсаций  $TKE$  и с учетом осредненных коэффициентов обеспеченности  $\theta_{max}$  и  $\theta_{min}$ .

При этом необходимо предварительно сопоставить величины  $P$  и  $TKE$  в стационарном и нестационарном расчетах. По опыту расчетов реальных конструкций средние давления воспроизводятся с практической точностью (до 5%). Кинетическая энергия пульсаций в стационарных расчетах нередко занижается, что можно "скомпенсировать" соответствующим увеличением коэффициентов обеспеченности.

Приведем основные расчетные соотношения методики:

$$\begin{aligned} P &= \rho V^2 / 2 \\ TKE &= 3/2 (I \cdot V)^2 = 3 \cdot P / \rho \cdot I^2 \\ I &= (\rho \cdot TKE / \text{abs}(P)/3)^{1/2} \\ \sigma_p &= (I^2 + 2 \cdot I) \cdot \text{abs}(P) \\ P^*_{max} &= P + \sigma_p \cdot \theta_{max} \\ P^*_{min} &= P - \sigma_p \cdot \theta_{min} \end{aligned}$$

Здесь:  $\sigma_p$  – среднеквадратичное отклонение (стандарт) давлений  $P$ ,  $I$  – интенсивность турбулентности (стандарт пульсаций скорости),  $V$  – локальная скорость ветра вблизи поверхности за пределами пограничного слоя.

В результате была выработана следующая схема расчетных исследований:

1. выполняются расчеты на упрощенной геометрии в стационарной и нестационарной постановке для наиболее характерных направлений ветра, определяется необходимая детализация сетки и неблагоприятные направления ветра;
2. по результатам стационарных расчетов для всех направлений ветра для упрощенной модели определяются наиболее неблагоприятные направления по максимальным значениям средних нагрузок и максимальной энергии турбулентных пульсаций на поверхностях; для этих направлений выполняется уточненный расчет при сгущенной сетке и/или с применением схем автоматической адаптации;
3. для этих направлений выполняется нестационарный расчет; при существенном отличии средних значений может оказаться необходимым выполнить нестационарные расчеты для многих или "всех" направлений ветра. Нестационарные расчеты также следует выполнять для направлений, при которых стационарный расчет указывает на возникновение "стоячей волны". Определяются коэффициенты обеспеченности по соотношениям (1);
4. по результатам нестационарных расчетов определяются средняя и пульсационная составляющие нагрузок на несущие конструкции для всех направлений ветра;
5. выполняются уточненные стационарные расчеты для всех направлений ветра при сгущенной сетке и/или с применением схем автоматической адаптации. Максимальные и минимальные

давления определяются по соотношениям с учетом коэффициентов обеспеченности;

6. определяются направления с максимальными пульсациями и анализируются спектры нагрузок;
7. определяются расчетные пиковые минимальные и максимальные локальные ветровые давления на ограждающие (фасадные) конструкции с использованием огибающих по всем направлениям ветра

В качестве основного расчетного инструмента выбран лицензионный универсальный программный комплекс (ПК) ANSYS, установленный в ГОУ ВПО МГСУ и допускающий также проведение прочностных и связанных аэроупругих расчетов.

Пакет программ ANSYS [7] достаточно распространен в России и мире и имеет более 400 тысяч коммерческих и исследовательских инсталляций и более миллиона легальных пользователей, являясь наиболее популярным в мире расчетным (CAE) ПК. Пакет сертифицирован по основным зарубежным стандартам (ISO-9001, ISO 9000-3, British standard BS 5750, Lloyd's Register's software certification, NAFEMS QA certification, The TickIT initiative и многим другим). Имеется сертификат Госатомнадзора России (Регистрационный номер ПС в ЦОЭП при РНЦ КИ №490 от 10.09.2002, Регистрационный номер паспорта аттестации ПС №145 от 31.10.2002) и сертификат Морского Регистра России.

Под руководством и при участии авторов проведена верификация программного комплекса ANSYS Mechanical согласно требованиям Российской академии архитектуры и строительных наук (свидетельство РААСН №02/ANSYS/2009).

Расчеты аэродинамики выполнялись с использованием программного модуля ANSYS CFX (далее CFX). Модуль CFX позволяет моделировать ламинарный и турбулентный потоки, сжимаемую и несжимаемую жидкости, связанные задачи теплообмена, многофазные потоки, процессы кипения, горения,

конденсации, фильтрации, химические реакции и многое другое. Поддерживаются более двадцати различных моделей турбулентности. CFX не включает генераторов сеток, но позволяет импортировать сетки, подготовленные различными программами, в частности и в препроцессоре ANSYS с использованием параметризуемых макросов ANSYS APDL.

Ряд процедур написан на языке FORTRAN и используется в форме исполняемых модулей EXE как отдельно, так и внутри макросов.

Поскольку расчеты на ветровые воздействия требуют задания множества нестандартных (для универсальных расчетных программ) параметров расчета и опций, определено, что для повышения эффективности вариантных расчетов и минимизации ошибок ввода наиболее целесообразно программно формировать текстовый стартовый файл, содержащий все необходимые признаки и опции для расчетной области (домена) и для граничных условий на внешних границах расчетной области, а также параметры рекомендуемых моделей турбулентности, опции решения, точки мониторинга и записываемые результаты.

Разработанные расчетные процедуры были оформлены в специальный программный модуль WINDLOAD/CFX, включающий в настоящее время около 80 "макросов" (процедур) на языке программирования APDL.

В рамках ПК ANSYS создаются и файлы с сеткой (\*.cdb) и программный код (\*.ccl) для ПК ANSYS CFX. Макросы составлены для различных типовых форм сооружений, для двумерной и трехмерной постановок, для различных вариантов учета симметрии, для различных подходов к формированию сетки. В рамках одного входного файла можно провести генерацию сетки в цикле (например, при вариациях геометрических параметров задачи и для вариантов застройки). Разработаны макросы для формирования стационарных и нестационарных профилей скорости ветра и параметров турбулентности, а также процедуры методик, описанных выше.

В рамках многочисленных практических и исследовательских работ проведена всесторонняя верификация разработанной методики и реализующего программного обеспечения на основе сравнения с результатами испытаний в аэродинамических трубах для моделей, включающих изолированные и группы высотных зданий, а также сравнения с результатами альтернативных расчетов и данными натурных замеров для реальной застройки.

#### 4. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

На первом этапе (одновременно с составлением детализированной модели вокзала) была составлена упрощенная модель объекта без учета застройки и рельефа (примерно 1 млн. ячеек). Подобраны наиболее экономичные параметры расчета и модели турбулентности, оценивались наиболее неблагоприятные направления ветра.

На данной модели была отработана методика многовариантного расчета на кластере с использованием специально разработанного командного скрипта на языке Python. Как показали вариантные расчеты, расчетные нагрузки определяются с практической точностью даже при сравнительно грубой сетке. Результаты с использованием моделей турбулентности RNG k-ε и SST достаточно хорошо согласовывались (отличие не превышало 10%). Для основных расчетов использовалась SST, характеризовавшаяся лучшей сходимостью и достижением невязок в 3-5 раз меньших при одинаковом числе итераций

Для удобства работы сетки для зоны застройки (гексаэдры и тетраэдры) и для непосредственной окрестности вокзала (призмы и тетраэдры) создавались независимо, на заключительном этапе генерировалась переходная зона (преимущественно пирамиды). Размер элементов на поверхности здания и

окружающих зданий был выбран с учетом тестовых расчетов.

В препроцессоре ANSYS были созданы компоненты (группы узлов) для последующего присвоения граничных условий. Далее модель была загружена в препроцессор ANSYS CFX.

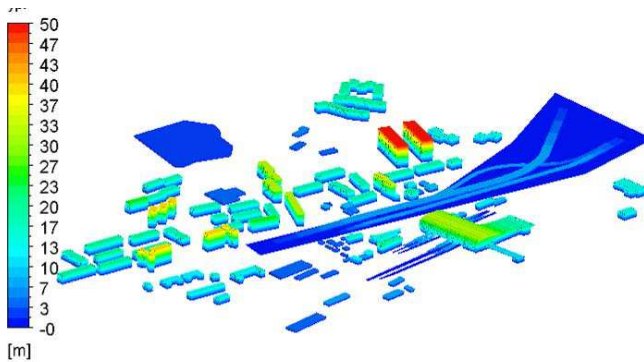


Рис. 4. Геометрическая модель застройки (указаны высоты в м с учетом рельефа)

По результатам тестирования в качестве основной была выбрана модель с 6.400 миллионов ячеек (и примерно 1.1 миллионов узловых точек). Размер сетки на поверхности не превышал 0.7 м. На поверхности расположено примерно 187 тысяч узловых точек. В окрестности вокзала размер элементов увеличивался до 3 м. В зоне эстакады варьировался от 1.2 до 5 м. В окружающем пространстве сетка плавно увеличивалась в размере (до 20 м на поверхности земли). Выше уровня 100м вплоть до 1000м типовой размер сетки составлял до 100м, В характерных зонах покрытия установлен слой призматических элементов общей высоты 500мм. Разработанная CFD-модель показана на рисунках 5-6.

Граничные условия на подходе соответствовали 3-му ветровому району и типу местности А (открытое пространство). Данные СНиП по профилям давлений и пульсациям были пересчитаны для ввода в программу ANSYS CFX в аналогичные зависимости от вертикальной координаты для скорости, интенсивности турбулентности и энергии диссипации, соответствующие расчетным зна-

чениям нагрузок (с учетом коэффициента 1.4).

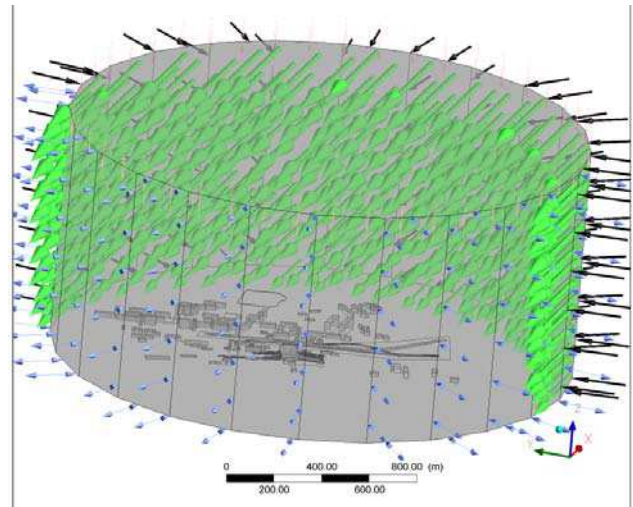


Рис. 5. Расчетная CFD-модель

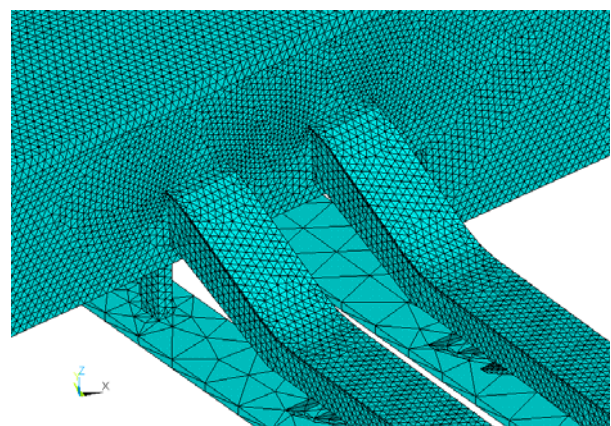
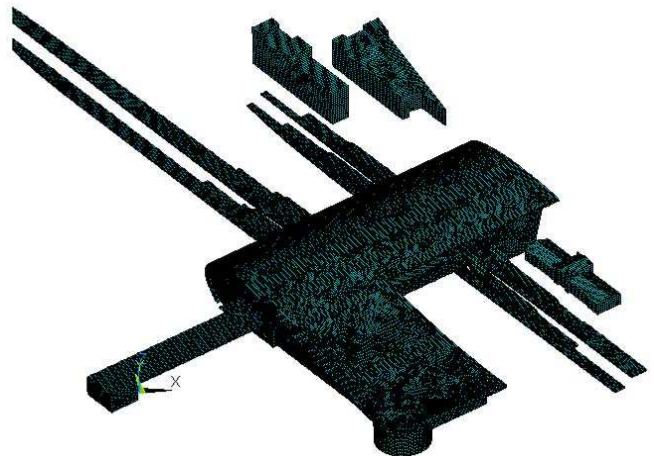


Рис. 6. Расчетная модель. Фрагменты

Прогноз ветровых воздействий в зоне большого Сочи на основе численного моделирования задач аэродинамики

Для предварительной оценки наиболее опасных направлений ветра были выполнены трехмерные расчеты в *стационарной постановке*. Для этого предварительно были составлены 24 расчетные модели, соответствующие углам атаки ветра от  $0^{\circ}$  до  $345^{\circ}$  с шагом  $15^{\circ}$  и объединены в единую модель для удобства расчета. Специально созданным макросом на языке Python генерировался текстовый файл для расчета CFX (\*.ccl), включающий все необходимые граничные условия, параметры и опции, а также создающий контрольные параметры для удобства мониторинга результатов в процессе счета.

Расчеты проводились с использованием моделей турбулентности SST и RNG k- $\epsilon$  вплоть до достижения невязок  $10^{-4}$ . Полный многовариантный стационарный расчет занимал около 10 часов (150 итераций) при стабилизации интегральных ветровых нагрузок. "Хорошая" монотонная сходимость позволила сделать вывод о оптимальности принятой сетки.

Далее характерные направления были повторно просчитаны в *нестационарной постановке*. В качестве начальных условий использовались результаты стационарного расчета. Отличия в результатах составили не более 10%, причем описанная выше оценка экстремальных значений из анализа стационарных результатов была в запас (более консервативной). По результатам этих расчетов была проведена оценка коэффициентов обеспеченностей (отношений амплитуд пульсаций к среднеквадратичному значению).

Основные расчеты проводились с использованием модели турбулентности SST. Шаг по времени 0.02 с был выбран на основе вычислительного эксперимента по критерию Куранта ( $Co < 2$ ). Расчеты выполнялись до достижения устоявшегося характера пульсаций (200-300с моделируемого времени).

В качестве примера приведем графики изменения во времени суммарных нагрузок (по осям,  $t_x$ ,  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) на ограждающие по-

верхности вокзала для угла  $75^{\circ}$ . Согласование средних значений с результатами стационарных расчетов хорошее (отличие не превышает 5%).

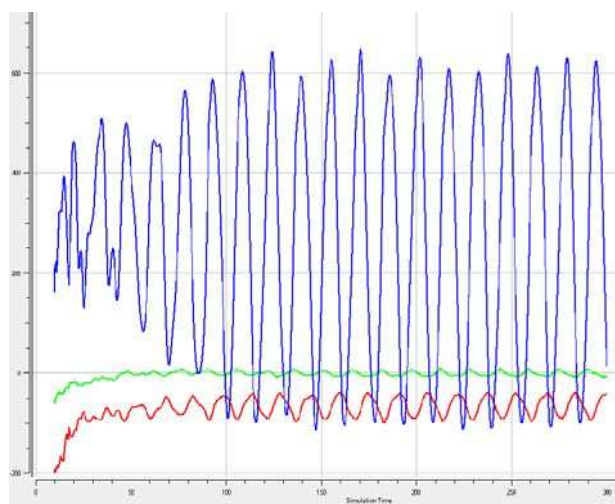


Рис. 7. Графики изменения во времени суммарных нагрузок (по осям,  $t_x$ ,  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) на ограждающие поверхности вокзала для угла  $75^{\circ}$

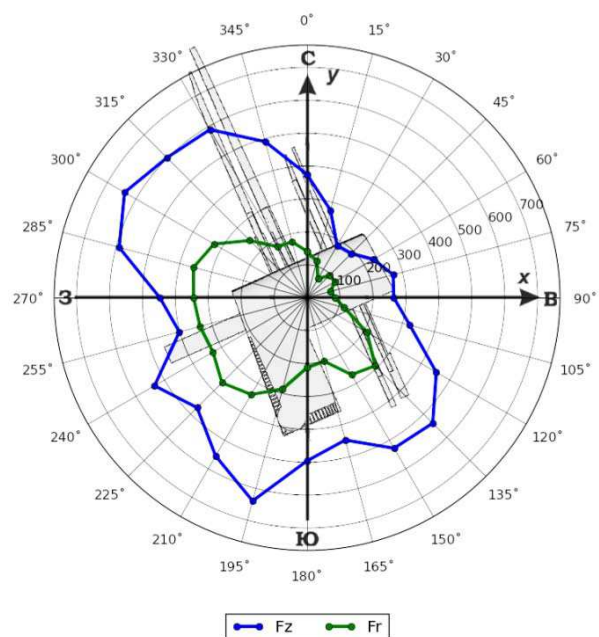


Рис. 8. Графики суммарной результирующей расчетной горизонтальной (зеленая линия) и вертикальной (синяя линия) ветровой нагрузки на несущие конструкции от направления ветра,  $t_x$

## 5. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Некоторые результаты расчетов представлены на рисунках 9-12. Для определения соответствующих давлений аэродинамических коэффициентов давления  $C_p$  представленные на рисунках величины следует разделить на характерный скоростной напор  $q$ . На уровне конька крыши для 3-го ветрового района и типа местности А (открытая территория) следует принимать  $q=820$  Па.

1. Для ряда зданий и сооружений, схожих по сложности с рассматриваемым, выполнено сравнение результатов трехмерных расчетов по разработанной CFD-методике с данными испытаний в аэродинамических трубах и натурными замерами – фиксируется практически приемлемый уровень соответствия.
2. На основе анализа и обобщения исходных данных разработаны и верифицированы расчетные трехмерные численные модели ветровой аэродинамики проектируемого ж/д вокзала с учетом рельефа местности и в существующей окружающей застройке.
3. С использованием современных численных методов гидрогазодинамики, реализованных в программном комплексе ANSYS CFX, на верифицированных трехмерных моделях проведены нестационарные расчеты при 24-х направлениях ветра (через  $15^\circ$ ):
  - средних и пульсационных составляющих ветровых нагрузок на несущие конструкции;
  - минимальных и максимальных ветровых давлений на фасадные конструкции.
4. Средняя составляющая расчетных ветровых нагрузок варьируется от -2,6 кПа (разрежение на узкой полосе вдоль кромок) до 0,84 кПа. Максимальная пульсационная составляющая расчетной ветровой нагрузки достигает 0,9 кПа. Для конкретизации расчетных средних и пульсационных ветровых нагрузок на несущие конструкции при различных направлениях ветра необходимо воспользоваться развернутыми результатами расчетов.
5. Определены расчетные “огибающие” максимальных и минимальных ветровых давлений (с учетом всех направлений ветра) на фасадные конструкции. Наименьшая отрицательная ветровая нагрузка на фасад вокзала составила -3.4 кПа и была отмечена на консоли покрытия. Для большей части фасадных конструкций наименьшие отрицательные ветровые давления превышают -1.5 кПа. Наибольшая расчетная положительная ветровая нагрузка на фасад составила 1.4 кПа на обращенной к морю части. Для большей части фасадных конструкций положительные ветровые давления не превышают 1 кПа.
6. При определении пиковых значений ветровых давлений принято, что конструктивные элементы ограждения и узлы их крепления к зданию являются достаточно жесткими и в них не возникает заметных дополнительных (аэроупругих, резонансных) динамических усилий и перемещений. В противном случае, значение этих нагрузок необходимо уточнить на основе результатов динамического расчета системы “элементы ограждения – их несущие конструкции – элементы их крепления”.
7. Разработанные параметризованные модели и полученные результаты численного моделирования ветровой аэродинамики рекомендуется использовать при формировании и осуществлении системы мониторинга.
8. Разработанные модели и полученные нагрузки могут быть в дальнейшем использованы для проверочных расчетов прочности несущих и фасадных конструкций, для оценки максимальных ускорений на уровне верхних этажей, а также (после получения уточненных данных о близлежащей застройке и зе-

ленных насаждениях) для оценки скоростей ветра в пешеходных зонах вокруг здания.

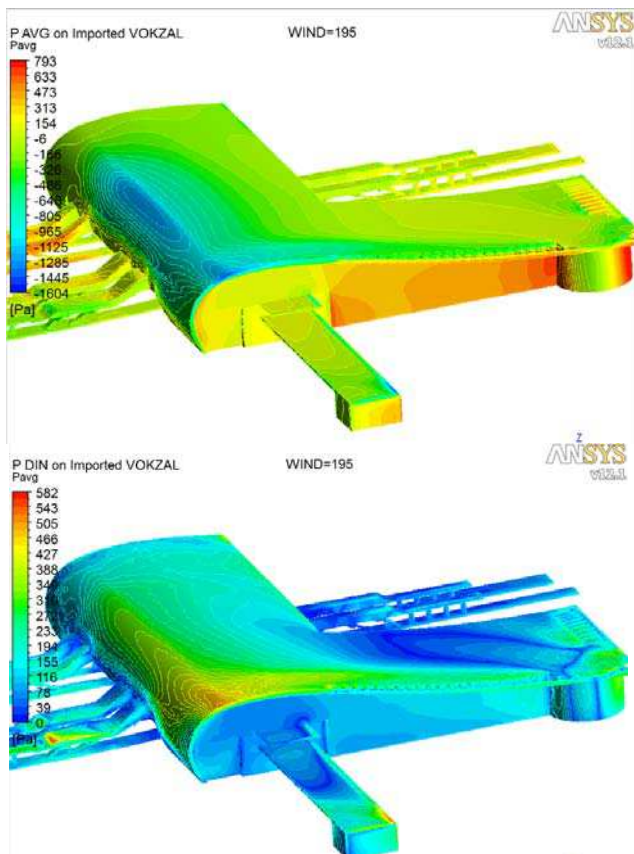


Рис. 9. Средняя и пульсационная составляющие для угла 195°.

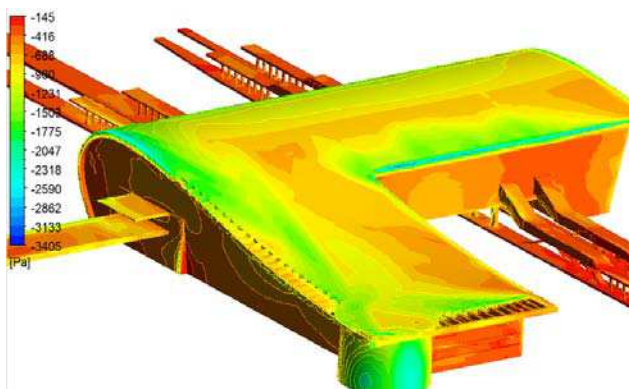


Рис.10 Минимальные давления, Па. Нижняя огибающая.

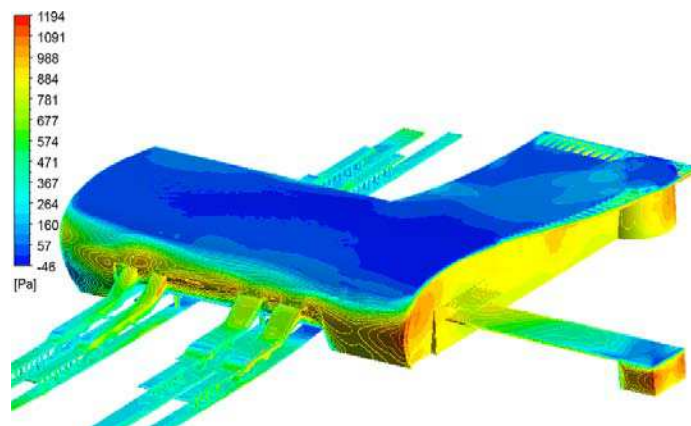


Рис.11. Максимальные давления, Па. Верхняя огибающая

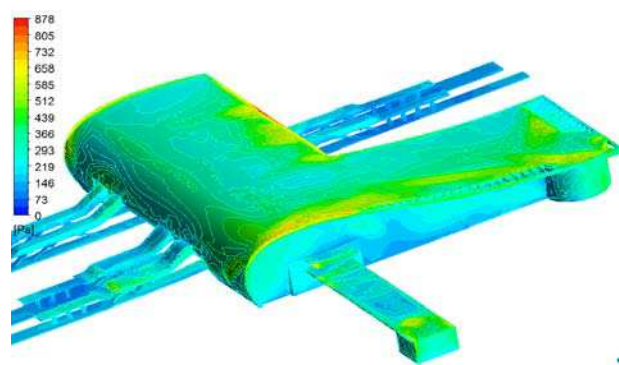


Рис. 12. Пульсационная составляющая давления, Па. Верхняя огибающая

#### Замечание.

Исследования проводились в рамках Гранта НШ-8684.2010.8 Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации «Многоуровневые численные, аналитические и экспериментальные методы исследования прочности зданий и сооружений с учетом конструктивных и физических особенностей» на 2010-2011 гг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Научно-технический отчет по договору № МГСУ-27733 (К.308-11) от 20.04.11. Определение расчетных и пиковых вет-

ровых нагрузок на конструкции проектируемого здания ж/д вокзала в г. Адлере на основе численного моделирования трехмерных задач аэродинамики.

2. СП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция. Госстрой России. М.: ГУП ЦПП, 2011, 44с.
3. Территориальные строительные нормы Краснодарского края. Нагрузки и воздействия. Ветровая и снеговая нагрузки. СНКК 20-303-2002. Краснодар, 2003
4. **Симиу Э., Сканлан Р.** Воздействие ветра на здания и сооружения – М.: Стройиздат, 1984, 360 с.
5. Eurocode 1: Basis design and action on structures. Part 2–4: Wind action. ENV 1991-2-4, CEN, 1994.
6. Рекомендации по уточненному динамическому расчету зданий и сооружений на действие пульсационной составляющей ветровой нагрузки. – Госстрой России, сост. Попов Н.А. // М.: ГУП ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2000. – 45 с.
7. ANSYS 12.1. User's Guide. Canonsburg, 2010.
8. **Дубинский С.И.** Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы. Дисс. на соискание ученой степени к.т.н. М., МГСУ, 2010.

тел/факс: +7 (499) 929-50-17;

E-mail: sergdubpodlipki@mail.ru, niccm@mgsu.ru

---

Белостоцкий Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор, генеральный директор ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО» (ЗАО НИЦ «СтаДиО»), директор Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов (НОЦ КМ) ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; тел/факс: +7 (495) 737-40-81, +7 (499) 257-77-61;  
E-mail: stadyo@stadyo.ru, niccm@mgsu.ru

Дубинский Сергей Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов (НОЦ КМ) ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26;

## ИССЛЕДОВАНИЕ РОЛИ ПОДВОДНЫХ КАНЬОНОВ В ВЫНОСЕ НАНОСОВ ИЗ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЧЕРНОГО МОРЯ

*И.А. Бровченко<sup>1</sup>, В.С. Мадерич<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Украинский центр экологических и водных проектов Академии технологических наук Украины,  
г. Киев, УКРАИНА

<sup>2</sup> Институт проблем математических машин и систем Национальной академии наук Украины,  
г. Киев, УКРАИНА

**АННОТАЦИЯ:** Целью данного исследования является оценка переноса наносов в районе каньонов в районе побережья Сочи (Имеретинская низменность). Используется трехмерная лагранжевая модель переноса многофракционных наносов LagrSed. Двумерные поля течений, уровня свободной поверхности и волновых характеристик рассчитывались с помощью двумерной модели гидродинамики прибрежной зоны COASTOX и спектральной модели волнения SWAN. Проведенное моделирование показывает, что донный материал (крупный гравий) распространяется, в основном, вдоль линии пятиметровой глубины и может разноситься на расстояние до 3-х километров вдоль берега в обоих направлениях на протяжении одного шторма.

**Ключевые слова:** прибрежная гидродинамика, лагранжевое моделирование, перенос наносов.

## STUDY OF THE ROLE OF UNDERWATER CANYONS IN SEDIMENT TRANSPORT FROM THE BLACK SEA EAST COAST

*Igor A. Brovchenko<sup>1</sup>, Vladimir S. Maderich<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Center for Environmental and Water Projects, ATS of Ukraine, Kiev, UKRAINE

<sup>2</sup> Institute of Mathematical Machines and Systems of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, UKRAINE

**ABSTRACT:** The aim of this study is the estimation of the sediment transport in the canyons in the region of the Sochi coast (Imeretinska lowland). Three-dimensional Lagrangian multifraction sediment transport model LagrSed is used. Two-dimensional flow fields, free-surface level and wave characteristics were calculated using two-dimensional hydrodynamic model of the coastal zone COASTOX and the spectral wave model SWAN. The simulation shows that the bottom material (coarse gravel) is distributed mainly along the five-meter depth and can spread to a distance of 3 km along the coast in both directions during one storm.

**Key words:** coastal hydrodynamics, 3D modeling, sediment transport.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Моделирование переноса взвеси водной среде представляет собой сложную задачу, особенно в случае гравитационных взвесенесущих потоков [1], в которых важно взаимодействие полей взвеси и течений. Примером таких течений на шельфе океанов и морей являются, например, мутьевые потоки в подводных каньонах на склонах. Имеретинская

низменность расположена в междуречье рек Псоу и Мзымта и взвесенесущие потоки из этих рек в Черное море относятся к такому типу течений. В последние годы был разработан ряд трехмерных эйлеровых и лагранжевых моделей переноса наносов (см. напр.[2]-[5]). По сравнению с эйлеровыми моделями лагранжевые модели [3]-[4] имеют ряд преимуществ, обусловленные естественным описанием процессов переноса частиц и

возможностью описания переноса на масштабах меньших шага эйлеровой сетки. Однако, в отличие от эйлеровых моделей [2], [5], в известных трехмерных лагранжевых моделях не рассматриваются процессы переноса многофракционных наносов. Обратное влияние сил плавучести, вызванных наличием взвеси на динамику потока, важное для расчетов мутьевых потоков в подводных каньонах, также учитывалось лишь в некоторых эйлеровых моделях (напр. [1],[6]).

## 2. ЛАГРАНЖЕВА МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА НАНОСОВ LAGRSED

Трехмерная лагранжева модель LagrSed [7] описывает размыв и осаждение многофракционных связанных и несвязных наносов, а также их смеси. В дальнейшем, для краткости, будем называть "песком" фракции несвязных наносов и гравия, заканчивая минимальным размером  $D$  частиц 0.063 мм, а "илом" - наносы, включающие непосредственно ил 0,004 <math> < D < 0.063 мм и глину  $D < 0.004$  мм. Слой воды и дно разделены на ряд слоев: водной слой, активный слой, несколько донных слоев и нижний донный слой (рис. 1).

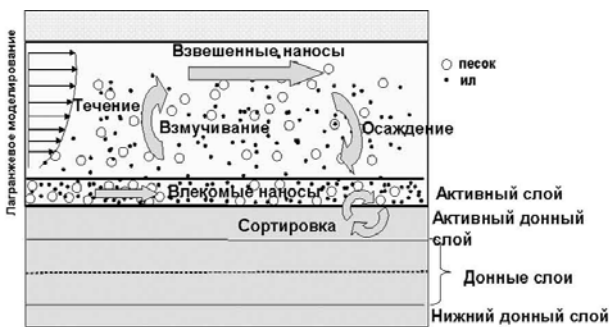


Рис. 1. Схема процессов переноса наносов [7].

Взвешенные наносы переносятся течениями и волнами в водной среде. В активном слое (АС) частицы песка могут двигаться в виде донных наносов, вовлекаться в высшие слои воды или оседать в самый верхний (активный) донный слой (АДС). Если в результате эрозии или дивергенции потока донных на-

носов толщина (АДС) становится равной нулю, тогда нижележащий донный слой начинает взаимодействовать с водным слоем и становится АДС. Если толщина АДС превышает некоторое значение  $h_{AB}^c$ , тогда возникает новый донный слой. Нижний донный слой не размывается. Модель позволяет рассчитывать перенос произвольного количества фракций несвязных наносов. Предполагается, что все частицы песка данного класса размеров АС и АДС одинаково испытывают действие потока воды и вовлечение в водный слой и АС, соответственно. Распределение фракций песка в АС отличается от распределения в АДС вследствие различной скорости вовлечения частиц разного размера в водный слой. Такая сортировка естественным образом приводит к эффекту "самоотмостки" донного материала. Влияние мигрирующих донных гряд на перенос и сортировку донного материала в модели не учитывается. Илы перемещаются в виде взвеси только в водном слое, вовлекаясь в него из АДС и оседая в АДС. Моделируется только один класс илов. Консолидация донных слоев в модели не учитывается. Процессы заиливания песка и ила в смеси могут быть взаимосвязаны. Условие сохранения массы ила в АДС, включающий одну фракцию ила и фракций песка имеет вид

$$p_m + \sum_{i=1}^n p_{si} = 1 \quad (1)$$

где  $p_{si}$  и  $p_m$  - содержание  $i$ -й фракции песка и фракции ила, соответственно, которое определяется как отношение массы частиц одного класса в АДС на элементе поверхности дна к массе всех частиц ила, содержащихся в этом объеме. Согласно [8] считается, что заиливание смеси ила и песка происходит по закону несвязных наносов, если содержание связанных наносов в АДС ниже критического значения, и по закону для связанных наносов, если концентрация связанных наносов в АДС выше критической.

Для моделирования взмучивания, оседания и переноса смеси используются лагранжевые методы. Концентрация наносов характеризуется ансамблем частиц, а задача переноса сводится к исследованию траекторий частиц. Масса ила в водном слое и в АС разделена на большое количество частиц одинаковой массы. Каждая частица обладает тремя свойствами в течение моделирования:

1. Состояние (или «взвешенная» или «На дне»).
2. Класс размеров (от 0 до  $n$ -того, «0»' класс соответствует илу).
3. Класс источника (от 1 до  $n_s$ -того)

Частицы «на дне» располагаются в АС, где частицы песка и ила могут оставаться на дне. Частицы песка в АС могут двигаться в виде донных наносов. АДС служит источником частиц для АС, когда этот слой теряет массу за счет перехода частиц во взвешенные илы и/или дивергенции потока донных наносов. Он также абсорбирует частицы из АС, когда толщина последнего превосходит некоторое заданное значение. Взвешенные частицы ила характеризуются диаметром "хлопьев", образующихся в результате слипания частиц в турбулентном водном слое. Частицы помечены классом источника для того, чтобы иметь возможность проследить траекторию частицы из заданного источника.

Для моделирования переноса взвешенных наносов в водном слое используется лагранжева модель случайных блужданий, в которой смещения частицы моделируются как случайный марковский процесс [9]. Уравнения для перемещений частицы на каждом шаге по времени  $dt$  имеют вид:

$$\begin{aligned} dx &= udt + \left(\frac{\partial K_x}{\partial x}\right)dt + \sqrt{2K}d\xi_x, \\ dy &= vdt + \left(\frac{\partial K_y}{\partial y}\right)dt + \sqrt{2K}d\xi_y, \\ dz &= wdt + w_s dt + \left(\frac{\partial K_z}{\partial z}\right)dt + \sqrt{2K_z}d\xi_z, \end{aligned} \quad (2)$$

Тут  $\vec{U} = (u, v, w)$  - адвективная компонента скорости частички,  $\vec{x}_i = (x, y, z)$  координаты частички; ось  $z$  направлена вверх, а начало координат  $z=0$  расположено на поверхности воды.  $w_s$  - скорость гравитационного оседания частичек в воде.  $K_x, K_y, K_z$  - ненулевые диагональные элементы тензора коэффициентов турбулентной диффузии, в модели предполагается  $K_x = K_y = K$ ,  $d\xi_x, d\xi_y, d\xi_z$  - нормально распределенные случайные величины с отклонением, равным  $dt$ .

Перемещение каждой частицы рассчитывается с помощью схемы Эйлера с дискретным временным шагом  $\Delta t = t_{n+1} - t_n$  следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta x_r &= \left(\frac{\partial K}{\partial x}\right)\Delta t + \sqrt{6K\Delta t}P_x, \\ \Delta y_r &= \left(\frac{\partial K}{\partial y}\right)\Delta t + \sqrt{6K\Delta t}P_y, \\ \Delta z_r &= \left(\frac{\partial K_z}{\partial z}\right)\Delta t + \sqrt{6K_z\Delta t}P_z, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $P_x, P_y$  и  $P_z$  - случайные величины, равномерно распределенные на интервале  $[-1;1]$ , коэффициенты диффузии  $K, K_z$  рассчитываются на  $k$ -том временном шаге. Трехмерные поля скорости и коэффициенты турбулентной диффузии рассчитываются с помощью гидродинамической модели. Эти значения линейно интерполируются в пространстве и времени для каждой частицы. Для переноса влекомых наносов используются эмпирические формулы для потоков влекомых наносов, которые зависят от характеристик донного материала и течения. Для расчета переноса песчинок используются формулы [10], при переносе крупных фракций наносов, таких как гравий, используется подход [11]. Для того, чтобы

рассчитать скорость частиц, которые перемещаются в виде влекомых наносов, выделяется небольшой участок площади, который обычно соответствует ячейке сетки гидродинамической модели используемой для расчета течений. На этом участке площади предполагается, что все частицы имеют одинаковую скорость. Зная значение потока влекомых наносов, площадь ячейки и количество частиц в АС рассчитывается скорость частиц в данной ячейке, и на текущем временном шаге частицы передвигаются согласно рассчитанной скорости.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Модель LagrSed использовалась для моделирования переноса наносов вблизи береговой зоны и подводных каньонов. Так как расчетная область покрыта крупным гравием диаметром более 4 см, то моделировался только перенос влекомых наносов. Диаметр частиц полагался постоянным, равным  $d = 40 \text{ мм}$ . Для анализа распространения галечных наносов выбран период шторма с 05.11.2007 по 15.11.2007. Двумерные поля течений, уровня свободной поверхности и волновых характеристик были предварительно рассчитаны при помощи комплекса моделирования включающего двумерную модель гидродинамики прибрежной зоны COASTOX и спектральную модель волнения SWAN для двух случаев: до и после постройки порта и защитных сооружений [12]. Гидродинамические поля и волновые характеристики были сохранены с временным шагом 0.5 часа. При работе модели все характеристики волнения и поля течений интерполировались в точку положения частиц наносов для расчета потока влекомых наносов.

Для моделирования была выбрана прямоугольная область протяженностью около 2 км вдоль берега и шириной около 500 м, достигающая до глубин около 100 м (рис. 2). Описанная область была покрыта слоем толщиной 50 мм наносов диаметром 40 мм, в ос-

тальной части расчетной области наносы отсутствовали. Моделирование происходило с временным шагом 30 с, в расчетах использовалось около 800 000 лагранжевых частиц, массой 500 кг каждая.

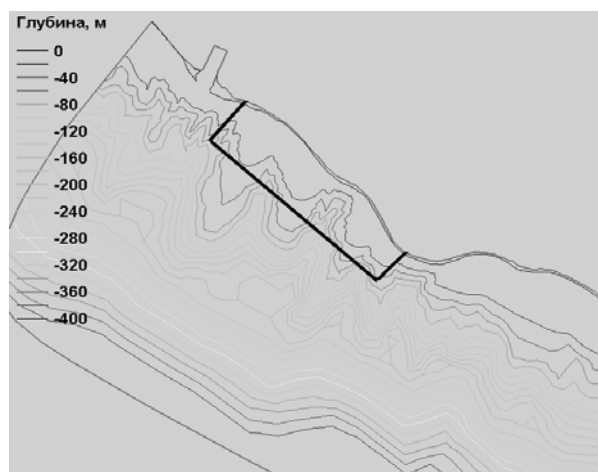


Рис. 1. Прямоугольная область моделирования, покрытая гравием диаметром 40 мм

Для моделирования была выбрана прямоугольная область протяженностью около 2 км вдоль берега и шириной около 500 м, достигающая до глубин около 100 м (рис. 2). Описанная область была покрыта слоем толщиной 50 мм наносов диаметром 40 мм, в остальной части расчетной области наносы отсутствовали. Моделирование происходило с временным шагом 30 с, в расчетах использовалось около 800 000 лагранжевых частиц, массой 500 кг каждая.

На рис. 3 - 6 показаны распределение максимальных потоков влекомых наносов в северо-западном и юго-восточном направлении на протяжении шторма для случаев до и после постройки порта и защитных сооружений. На протяжении шторма вдольбереговые течения меняли направление, при этом вдольбереговой перенос в северо-западном направлении был более интенсивный. Максимальный перенос в северо-западном направлении был в среднем в два раза интенсивнее, чем в юго-восточном направлении.

Исследование роли подводных каньонов в выносе наносов из береговой зоны восточного побережья Черного моря

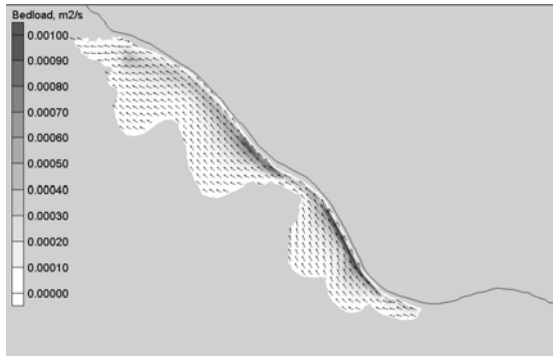


Рис. 3. Максимальный поток влекомых наносов в северо-западном направлении до сооружения порта

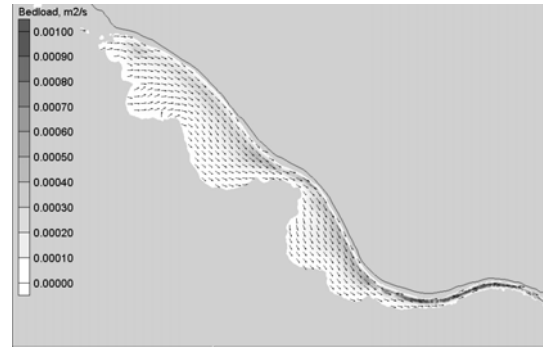


Рис. 4. Максимальный поток влекомых наносов в юго-восточном направлении до сооружения порта

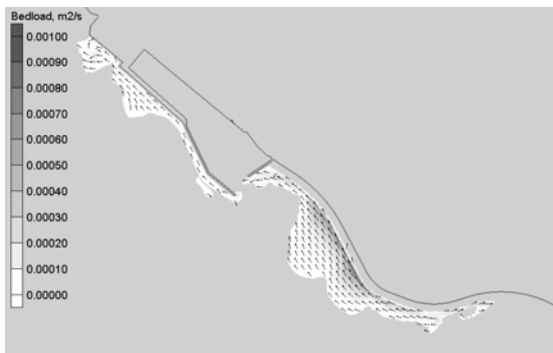


Рис. 5. Максимальный поток влекомых наносов в северо-западном направлении после сооружения порта

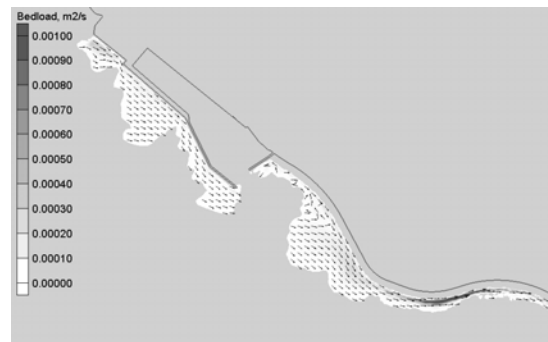


Рис. 6. Максимальный поток влекомых наносов в юго-восточном направлении после сооружения порта

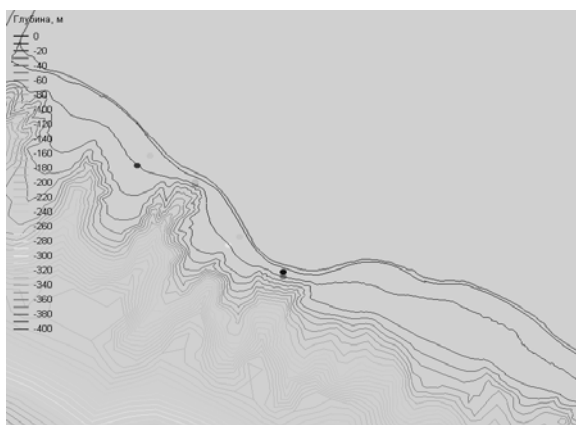


Рис. 7. Распределение точек, выбранных для анализа траекторий

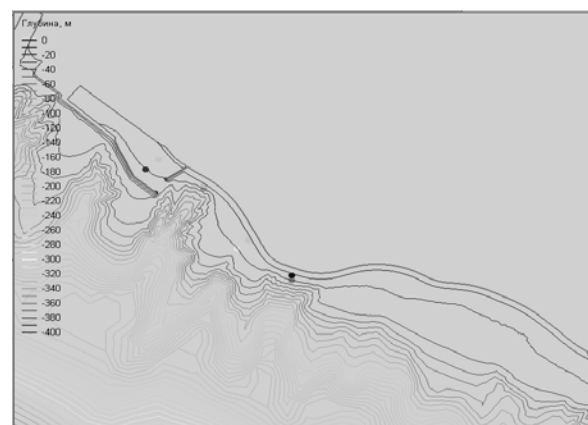
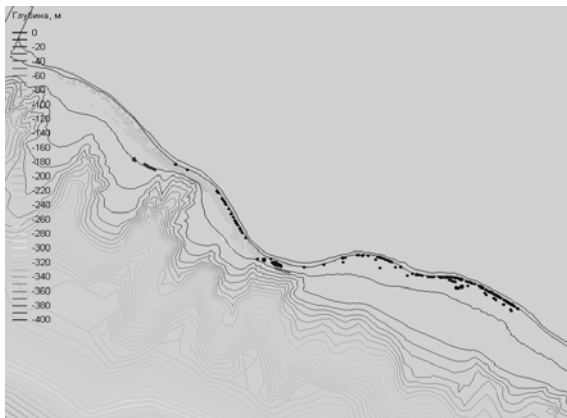
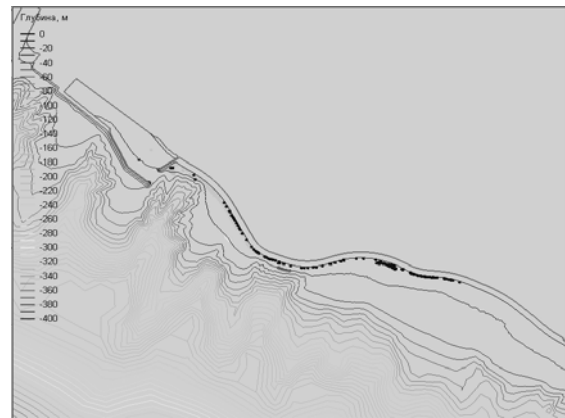


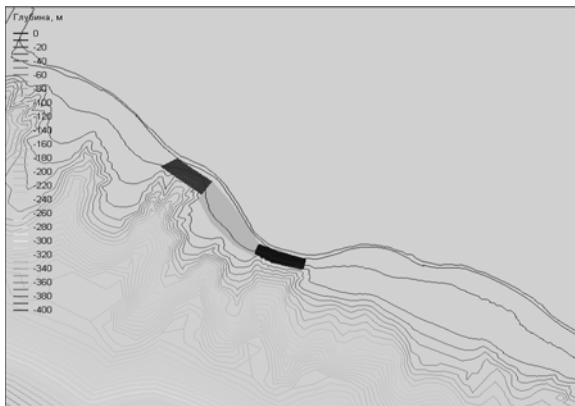
Рис. 8. Распределение точек, выбранных для анализа траекторий



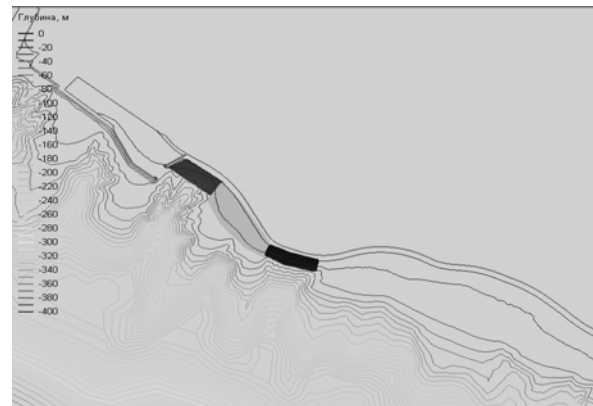
*Рис. 9. Распределение точек из распределенных источников после десятидневного шторма до постройки порта*



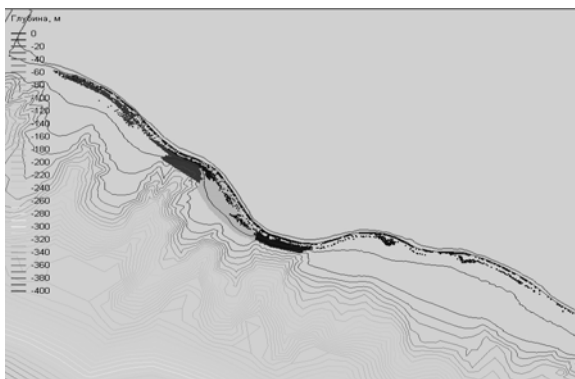
*Рис. 10. Распределение точек из распределенных источников после десятидневного шторма после постройки порта*



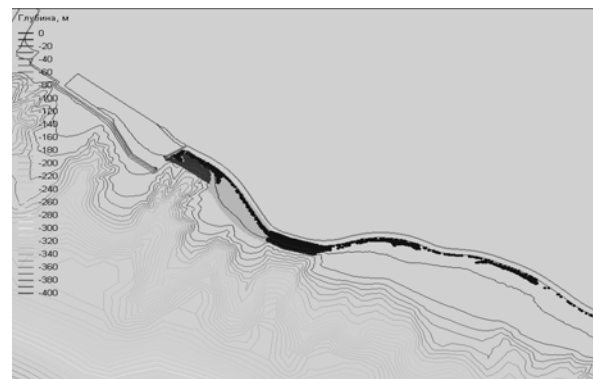
*Рис. 11. Распределение точек, выбранных для анализа траекторий*



*Рис. 12. Распределение точек, выбранных для анализа траекторий*



*Рис. 13. Распределение точек после десятидневного шторма до постройки порта*



*Рис. 14. Распределение точек после десятидневного шторма после постройки порта*

Для анализа траекторий движения частиц были рассмотрены две задачи: распространение наносов из 8-ми точечных источников (рис. 7-8) и разнос донных отложений из 3-х распределенных областей (рис. 11 и 12). Точечные источники расположены вдоль линий 5-метровой и 10-метровой глубины, и находятся напротив подводных хребтов и каньонов. Распределенные источники представлены на рис. 11-12 и располагались напротив каньона Новый, каньона Константиновский и на участке посередине между этими двумя каньонами.

#### 4. ВЫВОДЫ

Результаты проведенного моделирования показывают, что донный материал распространяется, в основном, вдоль линии пятиметровой глубины и может разноситься на расстояние до трех километров на протяжении одного шторма вдоль берега в обоих направлениях, в то время как частицы, изначально находившиеся на глубине 10м, сместились максимум на 250 метров. Сооружение порта блокирует перенос наносов в северо-западном направлении и несколько уменьшает интенсивность переноса в юго-восточном направлении, что видно из рис. 9,10 и 11,12. В целом, рассмотренный пример демонстрирует эффективность лагранжевого моделирования сложных процессов перераспределения наносов в прибрежных областях морей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Huppert H.E.** Gravity currents: a personal perspective // *J. Fluid Mech.* – 2006. – 554. - P.299 -322.
2. **Gessler D., Hall B., Spasojevic M., Holly F., Pourtaheri H., Raphael N.** Application of 3D mobile bed, hydrodynamic model // *J. Hyd. Engrg* – 1999. – 125. – P. 737-749.
3. **Krestenitis Y.N., Kombiadou K.D., Savvidis Y.G.** Modelling the cohesive sediment transport in the marine environment: the case of Thermaikos Gulf // *Ocean Sci.* – 2007. – 3. - P. 91–104.
4. **Lane A.** Development of a Lagrangian sediment model to reproduce the bathymetric evolution of the Mersey Estuary // *Ocean Dynamics.* – 2005. – 55 . P.-541-548.
5. **Lesser G.R., Roelvink J.A., van Kester J.A.T.M., Stelling G.** Development and validation of a three-dimensional morphological model // *Coastal Eng.* – 2004. -51 . - P. 883-915.
6. **Fohrmann H., Backhaus J. O., Blaume F., Rumohr J.** Sediments in bottom arrested gravity plumes-numerical case studies // *J. Phys. Oceanogr.* – 1998. – 28 – P. 2250-2274.
7. **Бровченко И.А., Мадерич В.С.** Трехмерная лагранжевая модель переноса многофракционных наносов и ее применение к описанию гравитационных течений // *Прикладная Гидромеханика* . – 2008. – 10 (82). N. 2 . - P. 22-31.
8. **Van Ledden M.** Sand–mud segregation in estuaries and tidal basins // PhD Thesis Delft University of Technology. Delft,Netherlands. -2003. - P. 221 p.
9. **Wilson J.D., Sawford B.L.** Review of Lagrangian stochastic models for trajectories in the turbulent atmosphere // *Bound.-Layer Meteor* 1996. – 78. P. 191-210.
10. Van Rijn, L. C. 1984a. Sediment transport: Part I: Bed load transport. *Journal of Hydraulic Engineering* 110(10):1,431-1,456.
11. **Camenen B, Larson M.** A general formula for non-cohesive bed-load sediment transport // *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 63 (2005), 249-260.
12. **Железняк М.И., Коломиец П.С., Демченко Р.И., Кивва С.Л.** Двумерное моделирование вдольбереговой циркуляции, переноса наносов и размывов галечных пляжей Имеретинской изменности (в данном номере журнала).

---

Бровченко Игорь Александрович, Украинский центр экологических и водных проектов Академии техноло-

гических наук Украины, 03187, Украина, г. Киев,  
Проспект Глушкова, 42.  
e-mail: [ibrovchenko@gmail.com](mailto:ibrovchenko@gmail.com)

Мадерич Владимир Станиславович, Институт проблем математических машин и систем Национальной академии наук Украины, 03187, Украина, г. Киев, Проспект Глушкова, 42.  
e-mail: [vladmad@gmail.com](mailto:vladmad@gmail.com)

Igor A. Brovchenko, Ukrainian center of environmental and water projects, ATS of Ukraine, 42, Prospect Glushkova, 03187, Kiev, UKRAINE,  
e-mail: [ibrovchenko@gmail.com](mailto:ibrovchenko@gmail.com)

Vladimir S. Maderich, Institute of Mathematical Machines and Systems of National Academi of Science of Ukraine, 42, Prospect Glushkova, 03187, Kiev, UKRAINE, e-mail: [vladmad@gmail.com](mailto:vladmad@gmail.com)

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЙ В РАЙОНЕ ГЛУБОКОВОДНЫХ КАНЬОНОВ ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЧЕРНОГО МОРЯ

*И.А. Бровченко<sup>1</sup>, В.С. Мадерич<sup>2</sup>, Е.В. Терлецкая<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Украинский центр экологических и водных проектов Академии технологических наук Украины, г. Киев, УКРАИНА

<sup>2</sup> Институт проблем математических машин и систем Национальной академии наук Украины, г. Киев, УКРАИНА

**АННОТАЦИЯ:** Приведены результаты численного моделирования поля течений в Черном море с использованием трехмерной модели циркуляции с ее детализацией в районе каньонов побережья Имеретинской низменности. Эти расчеты использованы для оценки условий переноса взвеси в этом районе.

**Ключевые слова** гидродинамика, трехмерное моделирование, Черное море

## NUMERICAL SIMULATIONS OF 3D STRUCTURE IN THE REGION OF DEEP CANYONS OF EAST COAST OF BLACK SEA

*Igor A. Brovchenko<sup>1</sup>, Vladimir S. Maderich<sup>2</sup>, Ekateryna V. Terletskaia<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Center for Environmental and Water Projects, ATS of Ukraine, Kiev, UKRAINE

<sup>2</sup> Institute of Mathematical Machines and Systems of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, UKRAINE

**ABSTRACT:** Results of numerical modeling of current in the Black sea using three dimensional circulation model with refinement in the region of canyons in the Imeretinka coast are given. These results were used for the estimation of sediment transport conditions.

**Key words:** hydrodynamics, 3D modeling, Black Sea

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Поступление и перераспределение наносов в море представляет собой сложный и многогранный процесс, и при его исследовании необходимо учитывать влияние, как гидродинамических факторов, так и географических особенностей береговой зоны. Процесс формирования стока наносов и их дальнейшая трансформация в морские отложения в Черном море протекает как на фоне активной деятельности человека так и под влиянием подводных каньонов. Только при учете основных факторов при моделировании можно получить результат, позволяющие

дать оценку будущего состояния литорали моря.

Задачей данного исследования является моделирование поля течений в Черном море с использованием трехмерной модели циркуляции, с ее детализацией в районе каньонов побережья в районе Сочи (Имеретинское побережье). Результаты расчетов использованы для оценки условий переноса взвеси в этом районе. Исследование выполнено в виде трех последовательных этапов:

1. Расчет гидродинамической гидростатической моделью SELFE трехмерных полей течений в Черном море на 5-ти километровой сетке до достижения

квазиравновесного состояния полей течений.

2. Инициализация модели по рассчитанным на первом этапе трехмерным полям на новой сетке со сгущением в районе Имеретинского побережья.
3. Расчеты трехмерных гидродинамических полей на протяжении недели на сетке со сгущением для анализа мелко-масштабной структуры течений, при прохождении шторма.

## 2. ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ SELFE, АДАПТИРОВАННАЯ ДЛЯ ЧЕРНОГО МОРЯ

Трехмерная гидростатическая модель SELFE [1] предназначена для расчета термогидродинамических полей в озерах, эстуариях и прибрежных зонах морей. Основными особенностями модели, оправдывающими ее применение к данной задаче расчета детализированной циркуляции в бассейне со сложной геометрией, являются использование неструктурированной конечно-элементной сетки по горизонтали и эффективного полунявного алгоритма решения задачи. В модели рассчитываются три компоненты скорости, температура, соленость и колебания свободной поверхности. Модель может работать как в сигма-системе вертикальных координат для точного описания рельефа дна, так и в  $z$ -системе, когда сигма-систему нельзя использовать из-за больших уклонов дна. Также модель может работать в смешанной системе:  $z$ -система в глубоких слоях, и сигма система на мелководной части области.

Уравнение модели записываются в декартовой системе координат  $(x, y, z)$ . Результирующими переменными гидро-динамики есть три компоненты скорости  $(u, v, w)$ , температура  $T$ , соленость  $S$  и колебания свободной поверхности  $\eta$ . Используется предположение гидростатичности давления и не-

сжимаемости жидкости. Ниже приведены основные уравнения:

$$\nabla \cdot \vec{u} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \int_{-h}^{\eta} \vec{u} dz = 0, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{D\vec{u}}{Dt} = & -f\vec{k} \times \vec{u} + \alpha g \nabla \hat{\psi} - \frac{1}{\rho_0} \nabla p_a - \\ & - \frac{g}{\rho_0} \int_{-h}^{\eta} \nabla \rho dz + \nabla \cdot (K_M \nabla \vec{u}) - \\ & - g \nabla \eta + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{DS}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_s, \quad (4)$$

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\dot{Q}}{\rho_0 C_p} + F_h, \quad (5)$$

$$\rho = \rho(T, S, P). \quad (6)$$

Тут введены обозначения:  $t$  - время;  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$ ;  $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \nabla + w \frac{\partial}{\partial z}$ ;  $h$  - глубина;  $f$  - параметр Кориолиса;  $g$  - ускорение свободного падения;  $\hat{\psi}$  - приливной потенциал;  $\alpha$  - параметр земного прилива;  $\rho$  - плотность воды;  $p_a$  - атмосферное давление на поверхности;  $\nu_t$  - коэффициент вертикальной турбулентной вязкости;  $K_M$  - коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости;  $\nu_t'$  - коэффициент вертикальной турбулентной диффузии для тепла и соли;  $F_s, F_T$  - члены уравнения, описывающие горизонтальную турбулентную диффузию для соли и тепла.

SELFE использует обобщенную модель турбулентности [2], которая описывается двумя уравнениями для турбулентной кинетической энергии и обобщенного масштаба:

$$\begin{aligned} \frac{DK}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial z} \left( v_k^\psi \frac{\partial K}{\partial z} \right) + \nu M^2 + \mu N^2 - \varepsilon \\ \frac{D\psi}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial z} \left( v_\psi \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\psi}{K} (C_{\psi 1} \nu M^2 + \\ &+ C_{\psi 3} \mu N^2 - C_{\psi 2} F_w \varepsilon), \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь  $v_k^\psi$  и  $v_\psi$  коэффициенты вертикальной турбулентной диффузии,  $C_{\psi 1}$ ,  $C_{\psi 2}$ ,  $C_{\psi 3}$  - константы модели,  $F_w$  - пристенная функция,  $M$  и  $N$  - порождение энергии турбулентности за счет сдвига и влияния сил плавучести. Обобщенный масштаб определяется как:

$$\psi = (C_\mu^0)^p K^m \ell^n, \quad (8)$$

где  $C_\mu^0 = \sqrt{0.3}$  и  $\ell$  масштаб турбулентного перемешивания. Выбор констант  $p, m, n$  приводит к различным моделям:  $k - \varepsilon$  [3],  $k - \omega$  [4],  $q^2 - q^2 \ell$  [5]. При этом

$$\begin{aligned} \nu &= \sqrt{2} s_m K^{1/2} \ell, & \mu &= \sqrt{2} s_h K^{1/2} \ell, \\ v_k^\psi &= \frac{\nu}{\sigma_k^\psi}, & v_\psi &= \frac{\nu}{\sigma_\psi}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\sigma_k^\psi$ ,  $\sigma_\psi$  параметры модели.

На поверхности воды напряжение трения принимается равным ветровому напряжению  $\vec{\tau}_a$ :

$$\nu \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} = \frac{\vec{\tau}_a}{\rho_0}, \quad (10)$$

тогда как на поверхности воды для турбулентной кинетической энергии и масштаба перемешивания используются граничные условия Дирихле:

$$K = \frac{1}{2} B_1^{2/3} |\vec{\tau}_w|, \quad l = \kappa d_s \quad (11)$$

Здесь  $\kappa$  - константа Кармана,  $d_s$  - расстояние от поверхности до первого расчетного узла.

Граничные условия на дне:

$$\nu \frac{\partial \vec{u}}{\partial z} = \vec{\tau}_b, \quad (12)$$

где донное трение  $\vec{\tau}_b$  описывается квадратичным законом на уровне  $z_r$ :

$$\vec{\tau}_b = \rho C_z |u_r| \vec{u}_r, \quad (13)$$

$$C_z = \left[ \kappa / \ln(z_r / Z_{0b}) \right]. \quad (14)$$

Здесь  $z_r$  - расстояние от дна до первого расчетного узла.

В модели используется конечно-элементный подход для решения системы уравнений. Расчеты проводятся на неструктурированных треугольных сетках. Это позволяет аккуратно задавать границы расчетной области и увеличивать или уменьшать разрешение расчетной сетки в местах, где требуется большая или меньшая точность расчетов. В модели используется полунявная численная схема по времени и смешанный эйлерово-лагранжевый алгоритм в расчетах инерционных членов уравнений движения. В гидродинамическую модель SELFЕ была включена модель теплообмена с атмосферой [6].

Для моделирования крупномасштабной циркуляции Черного моря на первом этапе была построена неструктурированная конечно-элементная сетка, состоящая из треугольных элементов с длиной стороны приблизительно 5 км. Расчетная сетка из 15000 узлов и 30000 треугольных элементов представлена на рис. 1. По вертикали использовалась смешанная система координат из 35 узлов: для поверхностного 10 метрового слоя использовалась сигма-система координат из 5 равномерных уровней, а 30 z-уровней расположены на глубинах 10, 12.5, 17.5, 22.6, 27.8, 33.0, 38.0, 43.8, 49.5, 55.6, 62.2, 69.2, 78.3, 88.6, 101.5, 118.3, 140.4, 170.3, 210.9, 266.0, 340.1, 437.5, 526.1, 716.0, 923.0, 1126.9, 1381.0, 1699.0, 2096.0, 2552 м соответственно.

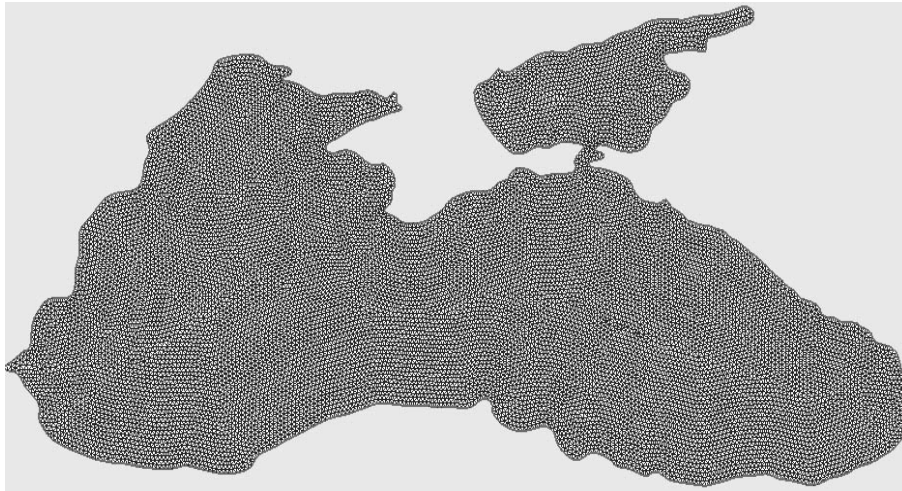


Рис. 1. Неструктурированная сетка Черного моря для описания крупномасштабной циркуляции



Рис. 2. Карта глубин Черного моря. Показана область сгущения сетки в районе Сочинского побережья

В качестве начальных условий использовались трехмерные климатические поля температуры и солености за январь из климатической базы данных Морского Гидрофизического Института НАН Украины.

В качестве граничных условий на поверхности использовались данные реанализа ERA-40 с интервалом 6 часов. На поверхности задавалась температура воздуха, облачность, влажность, компоненты скорости ветра и атмосферное давление. Данные ERA-40 получены основе глобального реанализа рядов

атмосферных наблюдений, спутниковых данных и состояния поверхности на сетке 40 км. Для расчетов были выбраны данные реанализа за 1992 год, так как он предшествовал сильному шторму 25 января 1993 года, когда скорости юго-западного ветра достигали свыше 25 м/с.

Водный баланс Черного моря зависит от стока рек, водообмена через Босфор, и от разности атмосферных осадков и испарения с поверхности моря. Суммарное количество пресных вод поступающих в море известно приближенно. Поэтому в данных расчетах,

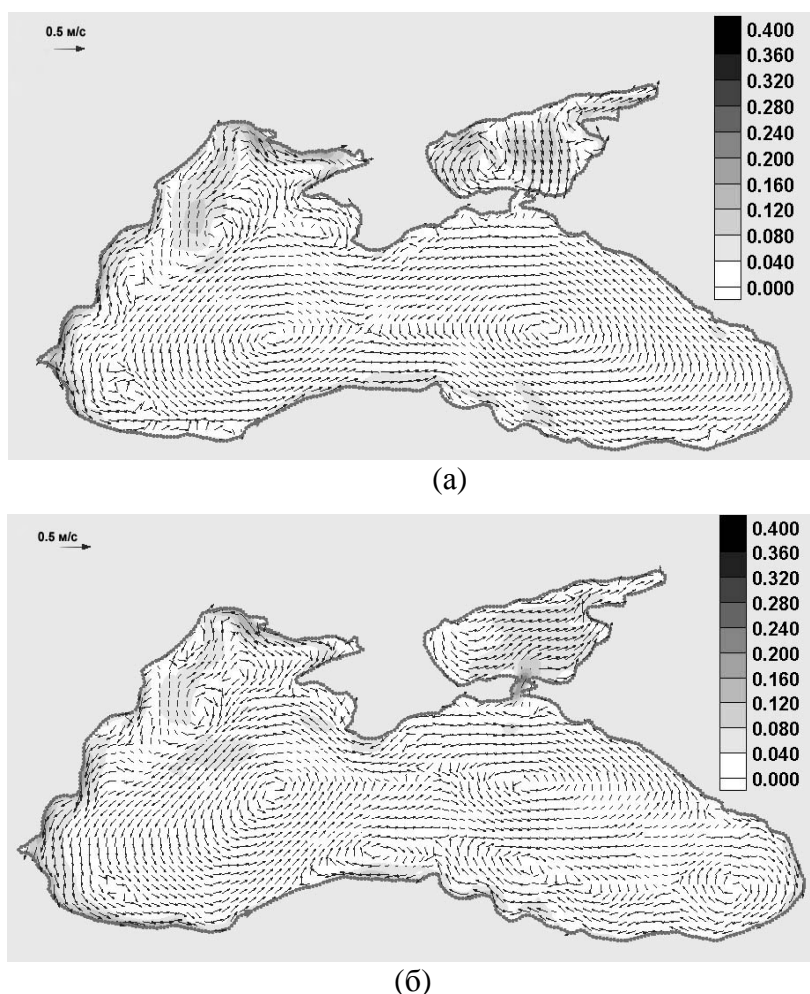


Рис. 3. Осредненные по глубине скорости (м/с), шкала – значение модуля скорости (а)- 1 января 1993 года, (б)- 1 февраля 1993 года.

проводившихся на относительно короткое время, объем моря считался постоянным, а в качестве граничных условий для солёности использовались условия релаксации на поверхности к заданному распределению солёности. Поля солёности у поверхности были взяты из климатической базы, Морского Гидрофизического Института НАН Украины. Водообмен через Босфор в данной задаче не учитывался, вследствие короткого интервала времени расчетов.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате проведенного численного моделирования крупномасштабных трехмер-

ных течений в Черном море, можно наблюдать классическую картину образования вихревых структур. Основным источником вихреобразования в прибрежной зоне является гидродинамическая неустойчивость Основного черноморского течения (ОЧТ), проявляющаяся в образовании замкнутых кольцевых течений рис. 3 (а,б). Другим, характерным для Черного моря типом вихрей, являются прибрежные антициклонические вихри, образующиеся в зоне между ОЧТ и берегом, которые видны на рис. 3 (б).

Для того, чтобы более детально рассмотреть характеристики трехмерных течений в области имеретинского побережья моделирование проводилось на неструктурированной сетке со сгущением узлов в районе г. Сочи.



Рис. 4. Неструктурированная расчетная сетка Черного моря в окрестности побережья Сочи. Приведены основные каньоны в районе Имеретинского побережья

Расчетная сетка состоит из 16200 узлов и 32000 треугольных элементов. В районе Сочи данная сетка имеет треугольные элементы с длиной стороны приблизительно 80 м, что позволяет хорошо описывать каньоны у Имеретинского побережья (рис.4).

На рис. 5 показаны вертикальные разрезы горизонтальных скоростей в восточной области Черного моря у поверхности и на глубине 50 метров в момент шторма 25 января 1993 года, когда скорости юго-западного ветра достигали 25 м/с.

На рис. 5 представлены вертикальные сечения поля скорости и солёности вдоль подводных каньонов на момент максимального шторма 25 января 1993 года. Максимальные значения ветровых скоростей у поверхности составляют около 0.5 м/с и направлены к берегу. Противотечение наблюдается на глубинах от 20 до 80 метров и имеет максимальные значения скорости около 20 см/с. Рассчитанных придонных скоростей недостаточно для трогания и переноса крупной галечной фракции донных наносов вдоль каньонов, однако, эти течения создают составляющую переноса донных отложений вдоль каньонов при вдольбереговом потоке наносов, вызванного волнами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zhang Y.-L., Baptista A.M.** "SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation". *Ocean Modelling*, 21, 2008, P. 71-96.
2. **Umlauf L., Burchard H.** A generic length-scale equation for geophysical turbulence models. *Journal of Marine Research* 61, 2003, pp. 235–265.
3. **Rodi W.** Turbulence models and their application in hydraulics. Technical Report Institute of the Association for Hydraulic Research, Delft, The Netherlands, 1980.
4. **Wilcox D.C.** Turbulence Modeling for CFD, second ed. DCW Industries, 1998.
5. **Mellor G.L., Yamada T.** Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Review of Geophysics* 20, 1982, p. 851-875.
6. **Кошебуцкий В., Мадерич В., Нестеров А., Хелинг Р.** Моделирование распространения тепла во внутренних водах и прибрежных областях морей. *Прикладная гидромеханика*. Т. 6, № 4, 2004, с. 34-44.

Бровченко Игорь Александрович, старший научный сотрудник, Украинский центр экологических и водных проектов Академии технологических наук Украины, 03187, Украина, г. Киев, Проспект Глушкова, 42; e-mail: ibrovchenko@gmail.com

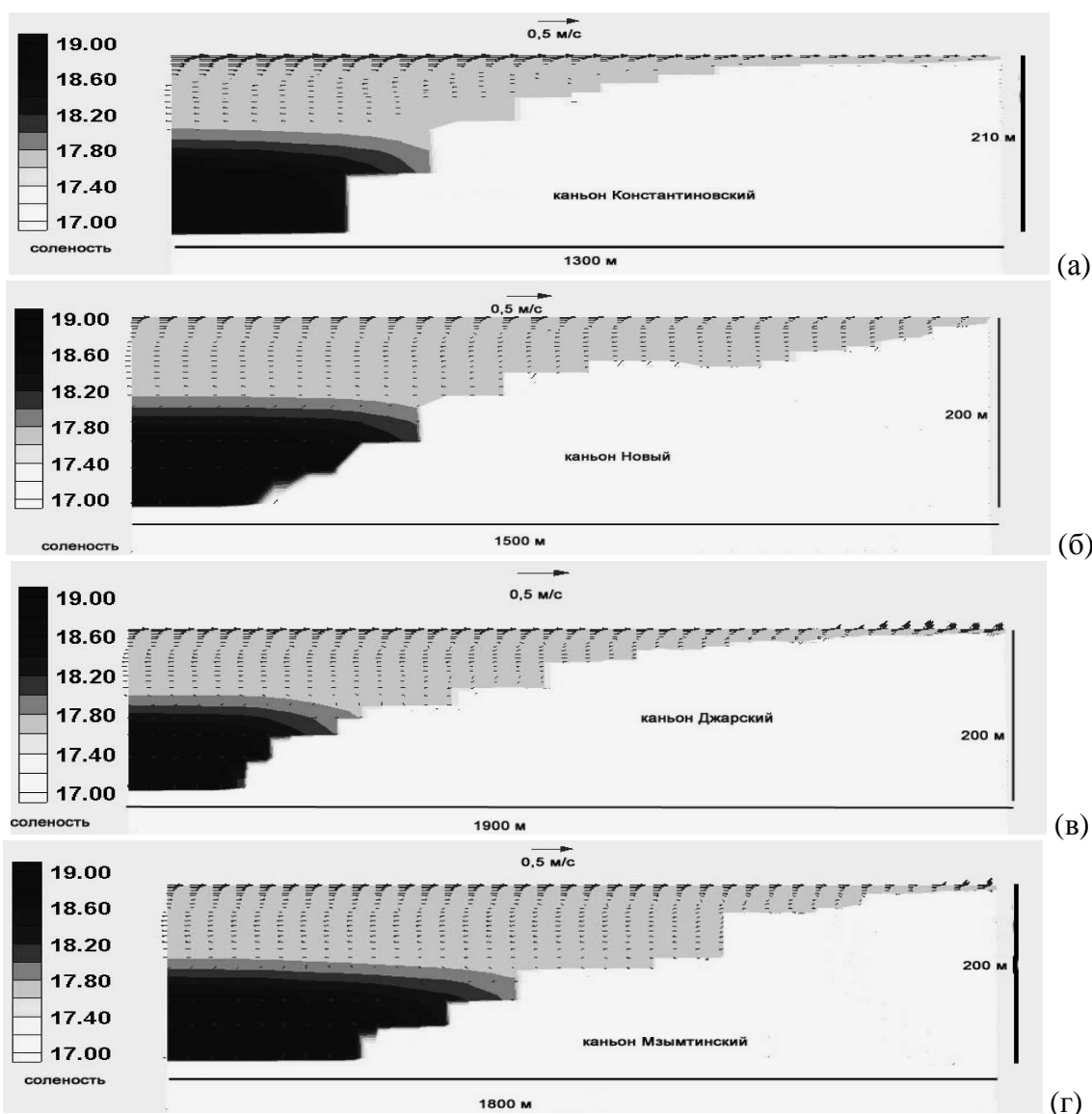


Рис. 5. Вертикальный разрез скоростей и поля солёности вдоль каньонов (а) – Константиновский, (б)- Новый, (в)-Джарский, (г)-Мзымтинский на момент шторма 25 января 1993 года

Мадерич Владимир Станиславович, Заведующий отделом моделирования морских и речных систем, Институт проблем математических машин и систем Национальной академии наук Украины, 03187, Украина, Киев, проспект Глушкова 42, e-mail: vladmad@gmail.com

Терлецкая Екатерина Валериевна, старший научный сотрудник, Украинский центр экологических и водных проектов АТН Украины, 03187, Украина, г. Киев, Проспект Глушкова, 42. e-mail: kterletska@gmail.com

Igor A. Brovchenko, Ukrainian center of environmental and water projects, ATS of Ukraine, 42, Prospect Glushkova, 03187, Kiev, UKRAINE, e-mail: ibrovchenko@gmail.com

Vladimir S. Maderich, Institute of Mathematical Machines and Systems of National Academy of Science of Ukraine, 42, Prospect Glushkova, 03187, Kiev, UKRAINE, e-mail: vladmad@gmail.com

Ekateryna V. Terletska, Ukrainian center of environmental and water projects, ATS of Ukraine, 42, Prospect Glushkova, 03187, Kiev, UKRAINE, e-mail: kterletska@gmail.com

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО РЕЖИМА ПОБЕРЕЖЬЯ ИМЕРЕТИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

*П.В. Дикий, Н.Н. Дзюба, М.И. Железняк, М.В. Сорокин*

Украинский центр экологических и водных проектов Академии технологических наук Украины,  
г. Киев, УКРАИНА

**АННОТАЦИЯ:** Волновой режим побережья Имеретинской низменности моделируется по многолетним данным о поле ветра над Черным морем с последующим расчетом трансформации волн в прибрежной зоне на основе уравнений приближения пологих склонов. Такой подход позволил рассчитать волновые параметры наибольших штормов последних десятилетий непосредственно в береговой зоне Олимпийского комплекса и оценить влияния проектируемых берегозащитных сооружений на изменения волновых характеристик в прибрежной зоне.

**Ключевые слова:** ветровые волны, волновой режим, моделирование, олимпийские сооружения

## MODELING OF WAVE CLIMATE OF IMERETINSKY LOWLAND COAST

*Pavel V. Dikiy, Natalia N. Dzyuba, Mark I. Zheleznyak, Maxim V. Sorokin*

Ukrainian center of environmental and water projects of Academy of technological sciences of Ukraine,  
Kiev, UKRAINE

**ABSTRACT:** Wave climate of Imeretinsky lowland coast was simulated on the basis of long term data on wave fields above Black Sea with follow up modeling of wave transformation in nearshore zone on the basis of mild slope equations. Such approach provides possibilities to calculate the wave parameters of the extreme wave storms of the last decades in nearshore zone of the Olympic complex and to assess the impact of the designed coastal protection structures on the changes of the wave parameters in nearshore zone.

**Key words:** wind waves, wave climate, modeling, Olympic constructions

Для определения режимных характеристик волнения в открытом море на подходе к Имеретинскому побережью использовались данные анализа полей ветра над Черным морем в 1980-2010 годах, на основе которых выделялись периоды наиболее сильных штормов в рассматриваемом регионе, для которых характеристики волн рассчитывались на основе современной численной модели SWAN [1,2]. Такой подход, ставший общепринятым в современных зарубежных и российских исследованиях [3] позволяет получить волновые характеристики непосредственно в исследуемом районе, в котором нет постоянных станций наблюдений за волнением. Этот подход является развитием ранее используемых методов, в

которых расчет волновых полей для района Имеретинской низменности основывался на полях ветра, определяемых по данным справочного руководства [4].

### 1. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНЕНИЯ В ОТКРЫТОМ МОРЕ И НА ВХОДЕ В ПРИБРЕЖНУЮ ЗОНУ ИМЕРЕТИНСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ

Для расчетов характеристик волн на глубоководной границе Имеретинского побережья анализировались данные реанализа NCEP/NCAR полей ветра в период с 1980 по 2010 годы с привлечением для корректировок данных, уточненных по спутниковым наблюдениям и измерениям волн в регионе.

NCEP/NCAR реанализ – проект Национального центра прогнозирования окружающей среды – National Centers for Environmental Prediction (NCEP) гидрометслужбы США (NOAA) и Национального центра атмосферных исследований США (NCAR) по восстановлению полей метеоэлементов за последние более чем 40 лет на всем земном шаре с использованием данных инструментальных наблюдений и результатов моделирования [5]. В качестве основного источника метеорологических данных после 1999 г. использовались метеорологические поля “финального анализа” NCEP [6] в котором проводилась дополнительная корректировка метеополей за счет данных спутниковых дистанционных наблюдений.

Для расчетов волновой моделью SWAN в указанный 30 летний период выбирались периоды сильных ветров румбов от Южного до Северо-Западного со скоростью ветра 12 м/сек и более, которые могут приводить к высоким штормовым волнам на побережье в районе г.Сочи. Ветер оценивался для всей восточной части Черного моря (восточнее Керчи). Всего в период 1979-2010гг по указанному критерию было выявлено 67 сильных штормов.

Расчеты волнового поля проводились спектральной моделью SWAN на трех регулярных прямоугольных сетках в сферических координатах (широта-долгота). Первая сетка включает в себя весь район Черного моря. Размер квадратной ячейки 1-ой сетки равен 1.5 минутам. Вторая сетка вложена в первую и включает в себя прибрежную зону г. Сочи. Размер ячейки этой сетки составляет 9 сек. Третья сетка, вложенная во вторую, покрывает район Имеретинской бухты от устья р. Мзымта до р. Псоу, причем размер ячейки также в 10 раз меньше размера ячейки предыдущей (2-ой) сетки и равен 0.9 сек. Батиметрия для расчетных сеток интерполировалась в узлах сеток по общедоступным в сети Интернет топографическим данным GEBCO на 30-ти секундной сетке, а для прибрежной части Имеретинской бухты использовались

глубины, измеренные эхолотом в рамках разработки проекта берегозащиты.

Расчеты производились спектральной моделью SWAN в три этапа – на каждой из трех вложенных сеток с последовательной передачей данных в граничных точках между ними.

Как пример расчета экстремальных штормов на рис. 1 - рис. 3. показаны поля ветра и поля волн, рассчитанные на двух сетках – первой и третьей для периода экстремального шторма 11.11.2007.

По результатам расчетов характеристик выявленных 67 самых высоких штормов в период 1980-2010 годов проведен анализ их статистических характеристик по методике ВМО [7]. Для оценки повторяемости штормовых волн в режиме построены графики эмпирических интегральных функций распределения вероятностей высот волн ИФРВ у мористой границы прибрежной шельфовой и зоны в районе восточной оконечности порта Имеритинский. Переход от ИФРВ к значениям обеспеченности  $P$  проводится по формуле  $P=1-I$ -ИФРВ, и, соответственно, повторяемость шторма  $n$  (количество лет, раз в которые может быть превышено значение данного параметра)  $n = 1/P$ . Аналогично определялась повторяемость волновых периодов.

В табл. 1 представлены 15 самых сильных штормов в указанный период, ранжированные по высоте значимой волны, а в табл. 2 рассчитанная повторяемость высот и периодов волн в системе штормов.

Как следует из представленных результатов, пятнадцать самых сильных штормов в регионе имеют обеспеченность в режиме 2%-20%. Среднее направление подхода волн к линии «граница лотка» по этим 15 штормам – 222 градуса. При этом среднее направление подхода волн четырех самых сильных штормов составляет 216 градусов при отклонениях всего в 1-2 градуса в этой группе. Таким образом, можно заключить, что к морской границе участка Имеретинского побережья с учетом его направления, самые высокие волны подходят в основном фронтально.

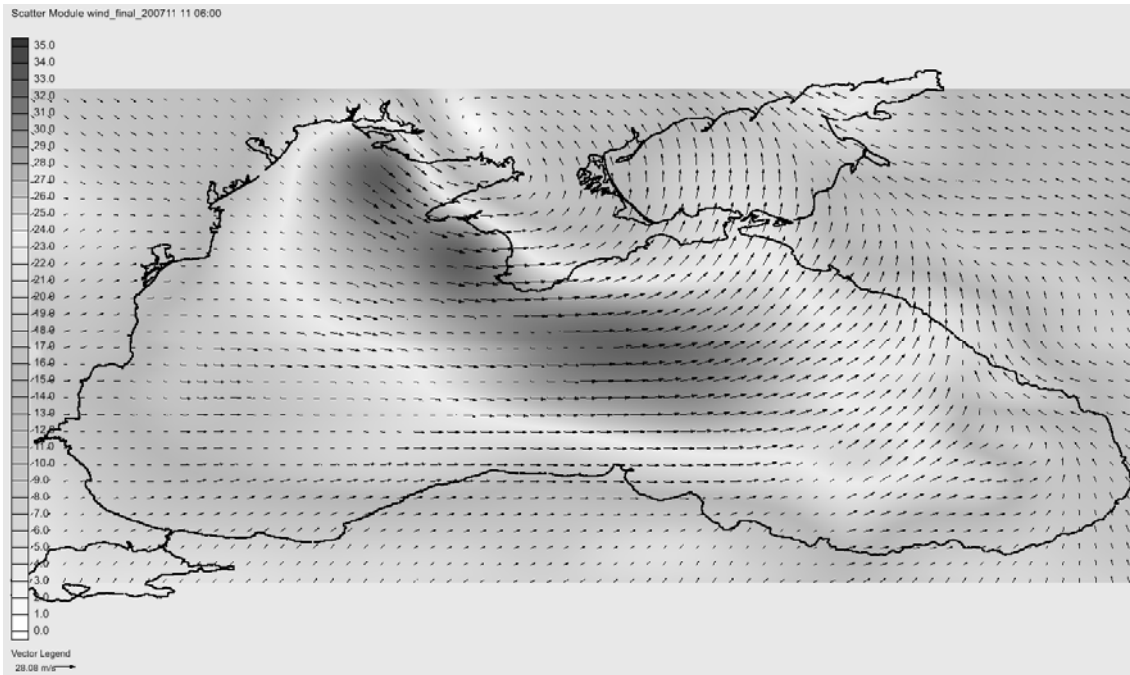


Рис. 1. Поле ветра по данным реанализа 11.11.2007г., 06:00.

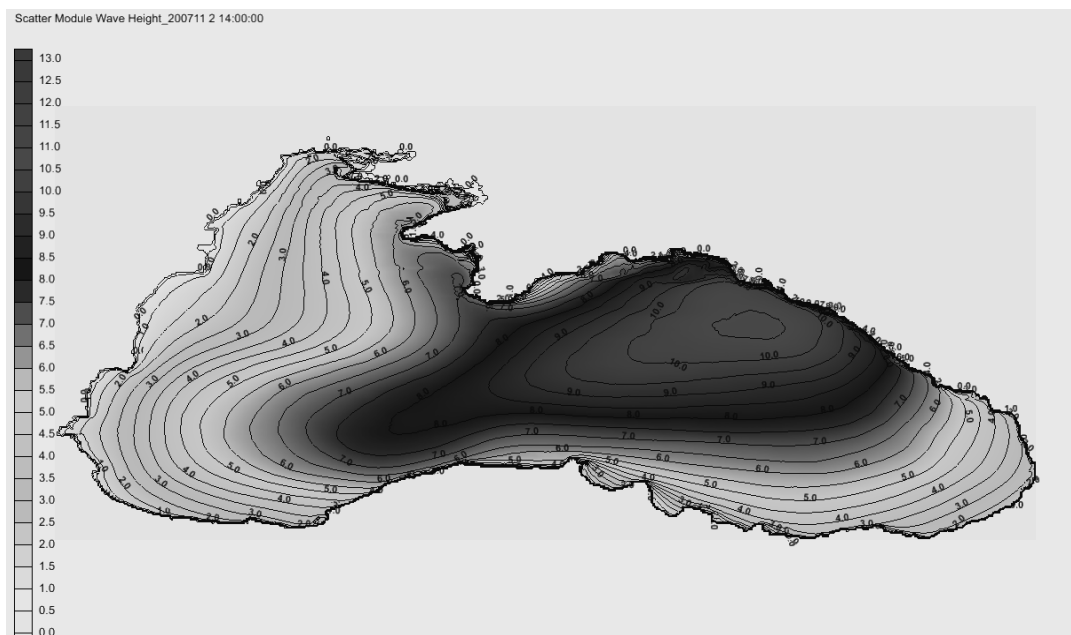


Рис. 2. Поле значительных высот волн 11.11.2007г., 14:00, рассчитанное моделью SWAN на первой сетке.

## 2. ТЕСТИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ

Тестирование модели проводилась на основании измерений волнографа – буя

Южного отделения ИО АН в районе Геленджика для шторма февраля 2003 г [8]. Буй установлен на глубине 85 м в точке с координатами  $44^{\circ}30.4$  с. ш ,  $37^{\circ}58.8$  в.д.

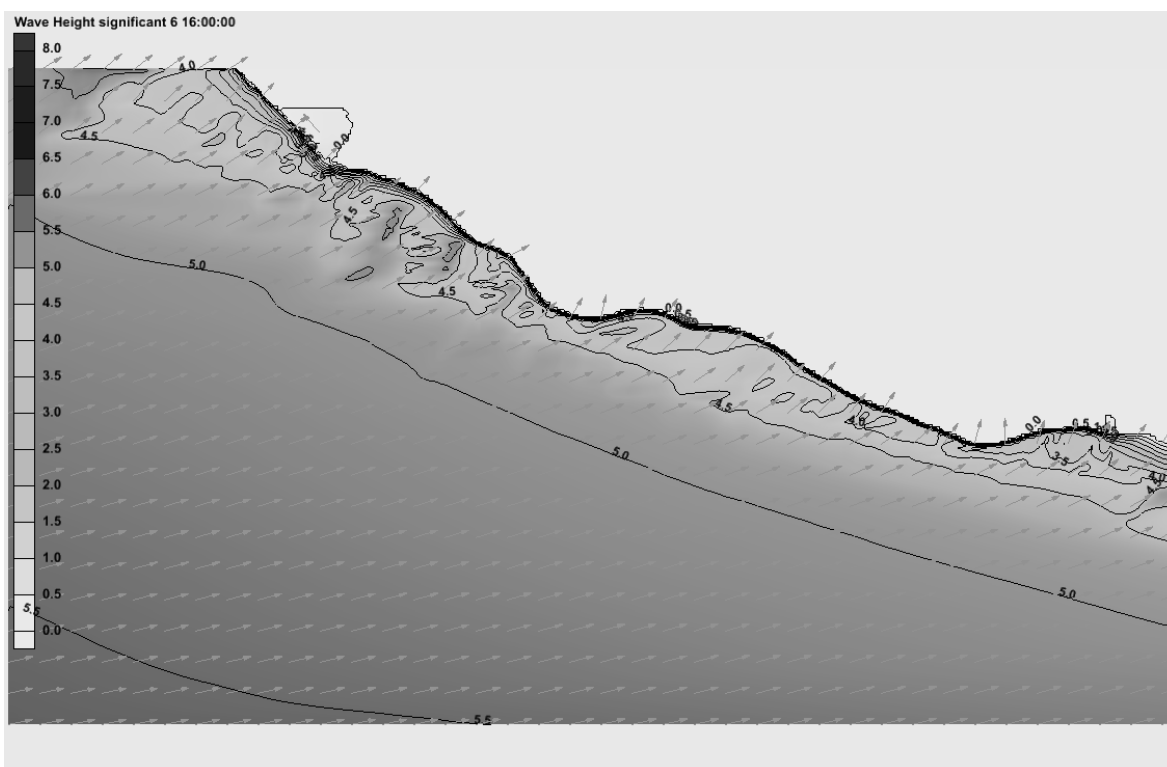


Рис. 3. Поле значительных высот волн 11.11.2007г., 16:00, рассчитанное моделью SWAN на третьей сетке – в прибрежной зоне Имеретинской низменности

Таблица 1. Максимальная высота значительных волн и направление подхода волн в 15 самых сильных штормах периода 1980-2010

Максимальная высота значительных волн и направление подхода волн в 15 самых сильных штормах периода 1980-2010			
№	Год, месяц-день, часы: минуты пика шторма	Высота знач. волн 13%	Направление, град.
1	1993, 01-25, 00:30	7.02	214
2	1987, 01-27, 08:30	6.67	217
3	1987, 01-03, 08:30	6.66	216
4	1989, 12-07, 18:30	6.65	217
5	1983, 03-07, 23:00	6.13	228
6	2006, 03-03, 23:00	5.91	241
7	2011, 11-16, 21:30	5.82	240
8	1998, 02-17, 10:00	5.81	183
9	1995, 01-01, 16:00	5.78	208
10	1999, 12-29, 02:30	5.76	228
11	1983, 12-28, 23:00	5.59	241
12	2007, 11-11, 14:00	5.58	228
13	1992, 01-17, 21:30	5.52	215
14	2001, 02-22. 13:00	5.46	217
15	2001, 10-24 .07:30	5.42	235

Таблица 2. Параметры значительных волн различной повторяемости в системе у мористой границы поря Имеретинский

Параметры значительных волн различной повторяемости в системе у мористой границы поря Имеретинский				
Повторяемость Раз в n, лет	ИФР	H, м	T, с	Даты близкого по параметрам шторма
1	0	3.1	5.7	
5	0.8	5.5	7.5	
10	0.9	5.8	8.0	1995-01-01, 1998-02-17, 1999-12-29, 2006-03-03, 2007-11-11,
25	0.96	6.5	8.4	1989-12-07, . 1987-01-03, 1987-01-27
50	0.98	7.0	9.5	1993-01-25

Таблица 3. Сравнение параметров волн r% обеспеченности с данными измерений для буя возле г. Геленджик

Сравнение параметров волн r% обеспеченности с данными измерений для буя возле г. Геленджик							
	Средняя высота волны, м	Средний период, сек	Высота знач. волны h 13%, м	Период знач. волн $\tau$ 13% сек	Высота волны h 0.1%, м	Период $\tau$ 0.1% сек	Пиковый период по SWAN, сек
Измеренные	4.32	8.9	7.0		$h_{max} = 12.34$	10.3	
Рассчитанные SWAN			6.54	7.89			11.64
Рассчитанные статистически	4.09	8.9			12.15	10,34	

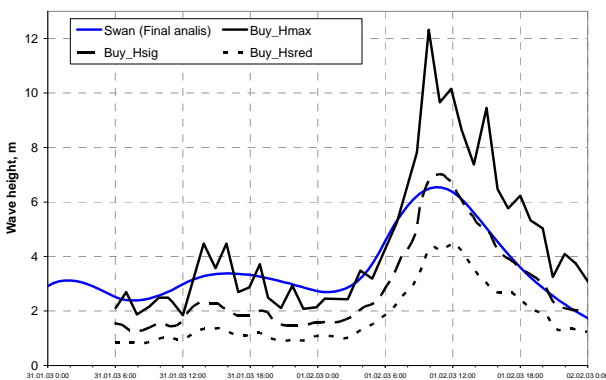


Рис.4. Сравнение высот и периодов волн, рассчитанных и измеренных волномерным буюм возле г. Геленджик.

Значения в точке буя изымались из результатов на вложенной сетке (с 10-ти кратным сгущением по сравнению с сеткой №1) для района Геленджика. Сравнение рассчитанных и измеренных высот волн представлено на рис.4 и в табл.3. Модель SWAN рассчитывает значительную высоту волн и период (13% обеспеченности). Поэтому высоты и периоды волн другой обеспеченности рассчитывались по формулам распределения волн различной обеспеченности в системе шторма, представленным в справочном руководстве [9]. В табл.3 также приведены значения рассчитанных таким способом высот и периодов волн 0.1% обеспеченности.

В ходе выполнения проекта проводилось сравнение результатов расчетов с данными Волноизмерительной станции (ВИС) «Сочи», которая находится в точке с координатами: 43град 33мин 53сек с.ш., 039град 44мин 32сек. Наблюдения за волнением моря на ВИС производятся визуально с помощью персептометра ГМ-12, установленного в помещении станции. Наблюдения ведутся по металлической свае, установленной на расстоянии 200 м от уреза воды. Глубина моря в месте установки сваи 5 м.

На рис. 15-18 представлены результаты сопоставления расчета высот и периодов волн, рассчитанных моделью SWAN с данными наблюдений на ВИС Сочи для экстремальных штормов 2007 и 2009 гг.

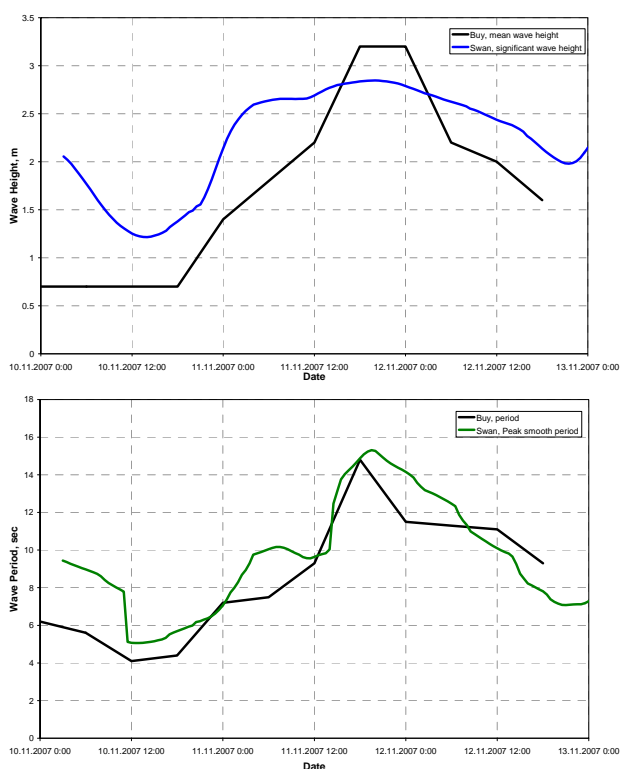


Рис. 5. Сравнение измеренных на ВИС «Сочи» и рассчитанных высот значимых волн (верхний рисунок) и пиковых периодов (нижний рисунок) во время шторма 11 ноября 2007 г.

Проведенное сравнение показывает, что высоты значительных волн во время штормов находятся в приемлемом диапазоне согласования с измеренными высотами волн. С измеренными периодами волн хорошо согласуются значения пиковых периодов, рассчитываемые SWAN. При этом, следует отметить, что в книге разработчика SWAN [9] показано, что при визуальных измерениях (как на ВИС Сочи) происходит систематическое завышение среднего периода волн при высоких штормах, поэтому именно с рассчитанным пиковым периодом может сопоставляться «наблюдаемый» средний период волн.

### 3. РАСЧЕТ ПОЛЕЙ ВОЛН В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ИМЕРЕТИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ ПО МОДЕЛИ SWAN

Волновые поля для прибрежной зоны Имеретинской низменности до и после возведения берегозащитных сооружений моделировались спектральной моделью SWAN на неструктурированных сетках. Выбор неструктурированных сеток для расчета прибрежных волновых полей был сделан ввиду более детального разрешения сетки (около 6м) в районе береговой линии, что позволило более точно учесть влияние сложной батиметрии области и избежать ошибок интерполирования в дальнейших расчетах гидродинамических моделей.

Рассчитывались штормовые сценарии за 5 лет с 1983 по 1987гг, а также 3 больших шторма – декабрь 1989г, январь 1993г (максимальный за 30-ти летний период) и ноябрь 2007г. На морской границе расчетной сетки задавались волновые спектры, полученные из расчетов на сетке №2 района Сочи.

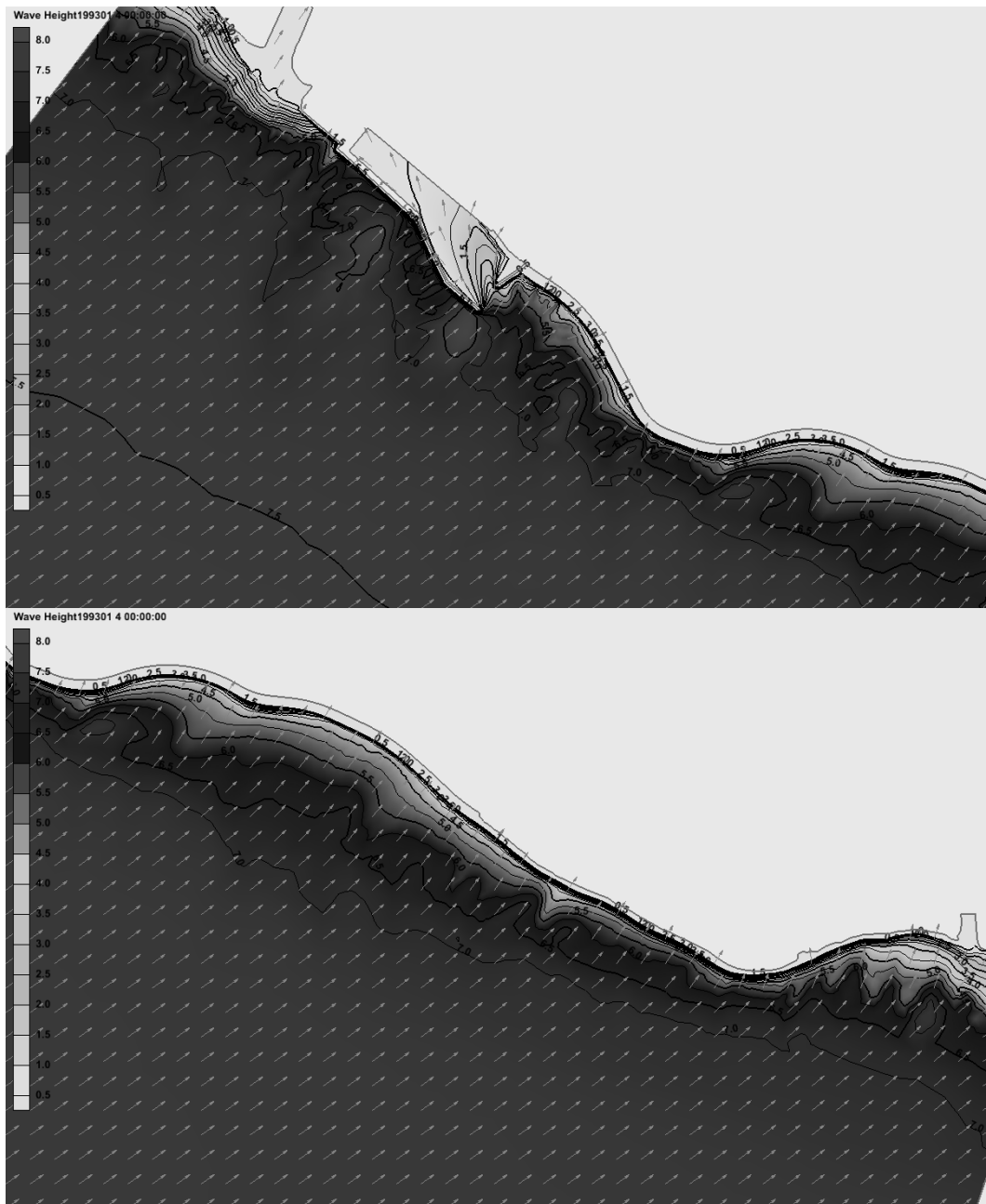


Рис. 6. Поле значительных высот волн во время пика шторма 25.01.1993г. Участки от р. Мзымта до м. Константиновский (верхний рисунок) и от м. Константиновский до р. Псоу (нижний рисунок).

Примеры расчета волновых полей прибрежной зоны для шторма 25.01.1993, который имеет повторяемость в режиме 2% (раз в 50 лет) показан на рис. 6. Как видно из рисунков, в основном направление подхода больших волн – Юго-Западное. Расчеты для всех рассмотренных штормов показывают,

что на глубокой воде, на расстоянии 1.5-2км от берега, высота подходящей волны составляет около 7м (1987,1989гг), а для шторма 1993г - 7.5м. Наиболее опасными участками волнозащитной дамбы является ее восточное окончание - участок длиной 150м, и середина этой дамбы. В районе

восточного мыса могут подходить большие волны высотой - от 7.4м в шторма 1987г, 1989г до 8м в шторм 1993г, что можно объяснить близостью глубоководного каньона Новый. К середине волнозащитного мола могут подходить волны от 7м (1987, 1989г) до 7.5м (1993г). В районе мыса Константиновский большие волны, не трансформируясь на глубокой воде в каньоне Константиновский, подходят достаточно близко к берегу, и поэтому на расстоянии 65м от берега могут наблюдаться волны от 6.2 (1987г.) - до 6.6м (1993г.). В районе мыса Джарского (участок берега протяженностью 500м западнее мыса и 300 м восточнее) большие волны тоже достаточно близко подходят к берегу, на расстоянии 30м от берега могут появляться волны от 4.5м (1987г) до 5.3м высоты (1993г.).

Для более наглядного представления о величинах высот волн на подходе к различным участкам берега, были построены три сечения - первое вдоль портового мола на расстоянии 25-30м от мола, второе вдоль берега от порта до м.Константиновский, третье от м. Константиновский до устья р. Псоу. 2-е и 3-е сечения проходят в море на удалении 50м от береговой линии.

Графики сравнения высот волн для штормов 1993 и 2007 гг вдоль трех сечений показаны на рис. 7-9. Как видно зоны больших волн в районе портового мола не случайны и существовали ранее, они не вызваны постройкой самого мола, а обусловлены природными характеристиками морского дна - а именно глубоководными каньонами вблизи мола. Высоты волн на подходе к молу не сильно изменилась после его постройки. В основном имеет место уменьшение высот волн после постройки порта (хотя есть небольшие участки и с большими волнами), местами (на отметке 1200 м) разница высот волн составляет до 70 см, что связано с большей длиной разгона волн в природных (без порта) условиях.

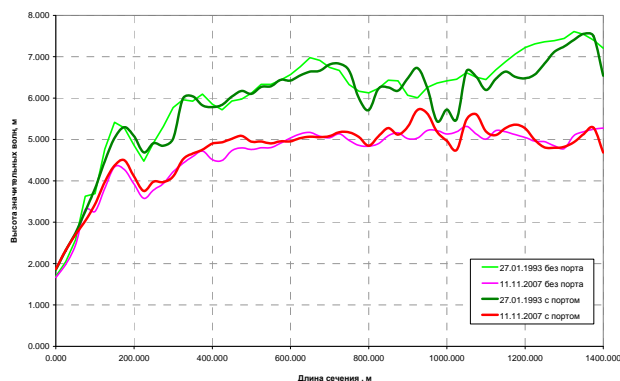


Рис. 7. Сравнение высот значительных волн для сечения вдоль волнозащитного мола порта Имеретинский для штормов 1993 и 2007 гг.

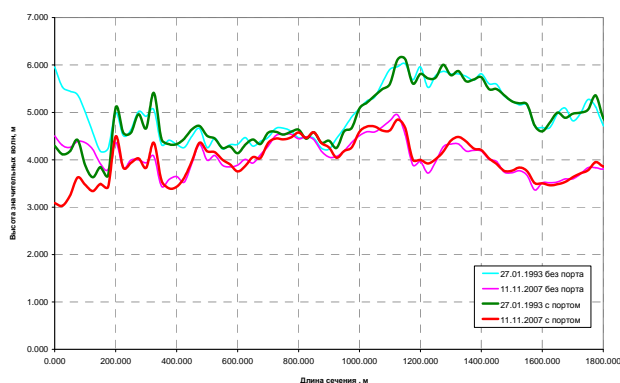


Рис. 8. Сравнение высот значительных волн для сечения вдоль берега от порта Имеретинский до м.Константиновский для штормов 1993 и 2007гг.

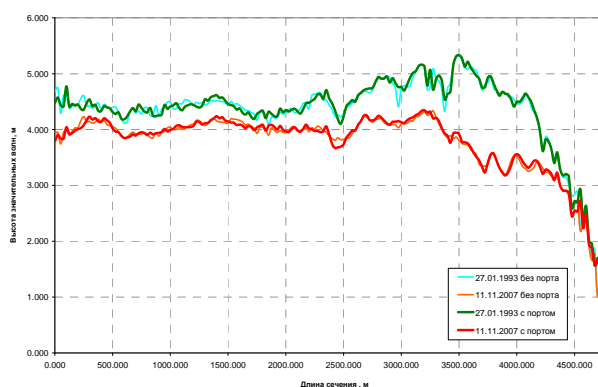


Рис. 9. Сравнение высот значительных волн для сечения вдоль берега от м.Константиновский до р.Псоу для штормов 1993 и 2007 гг.

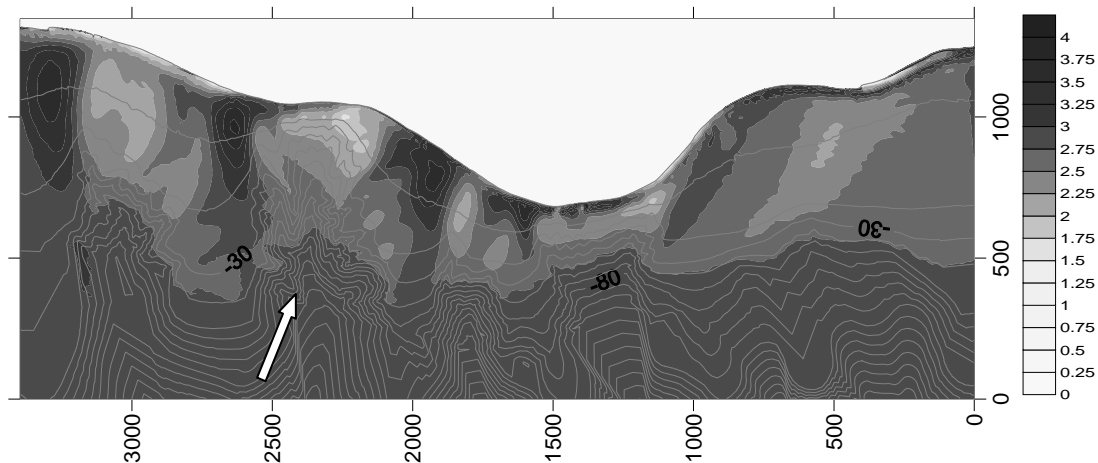


Рис.10. Поле значительных высот волн у Имеретинского побережья в период максимума шторма 12.2009, рассчитанное моделью HWAVE\_S (падающая волна  $H=3.03$  m,  $T=9.22$  s).

Поведение волн в районе восточнее порта до мыса Константиновский, а также и после мыса до р. Псоу почти не отличается от естественного.

#### 4. ДЕТАЛИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАЦИИ ВОЛН В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ИМЕРЕТИНСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ С УЧЕТОМ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ

Расчитанные характеристики волн на внешней границе детальной расчетной сетки прибрежной зоны использовались для расчета трансформированных полей волн в прибрежной зоне с детализированным описанием рефракционно – дифракционной моделью HWAVE, которая в монохроматическом [10] или спектральном варианте [11] основывается на гиперболической аппроксимации уравнения пологих склонов. На рис. 10 показано волновое поле у побережья Имеретинской низменности, расчитанное соответственно в периоды максимума шторма декабря 2009 спектральной версией модели HWAVE – HWAVE\_S. Результаты расчетов показывают более четко выраженные зоны фокусировки и дивергенции в волновом поле, чем следуют из аналогичных расчетов модели SWAN, что

обусловлено изрезанным рельефом прибрежной зоны Имеретинской низменности. С учетом необходимости значительных временных затрат при использовании модели HWAVE\_S, она использовалась в этом исследовании только для расчетов подходящих к берегу волн при расчетах наката волн на берег, а волновые поля, расчитанные SWAN использовались для расчета генерируемых волнами прибрежных течений.

#### ВЫВОДЫ

1. Проведен расчет параметров ветровых волн в прибрежной зоне Имеретинской низменности по реальному полю ветра. 1980-2010 годов. Выявлено 67 самых сильных шторма для Имеретинского побережья, для которых проведены расчеты высот и периодов волн различной повторяемости в режиме и в системе. При этом на мористой границе прибрежной зоны для шторма повторяемости раз в 50 лет в режиме высота значительных волн достигает 7.0 м и 1% волн в системе - 10.6 м для шторма повторяемости раз в 25 лет в режиме высота значительных волн достигает 6.5 м и 1% волн в системе - 10.1 м для шторма повторяемости раз в 10 лет в режиме высота значительных волн достигает 5.8 м и 1% волн в системе - 8.7 м

2. Поля ветровых волн в прибрежной зоне Имеретинской низменности рассчитаны на детальную расчетную сетку с учетом фокусировок на неоднородностях донного рельефа за счет дифракционных и рефракционных эффектов. Проведено сравнение рассчитанных высот волн с данными измерений на ВИС Сочи и с данными волнового буя в бухте Геленджик, показавшие эффективность модели. Проведен анализ прибрежных волновых полей для наиболее значительных штормов последних десятилетий и проанализировано влияние нового порта Имеретинский и берегозащитных сооружений на волновой режим

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Holthuijsen L.H.** Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge University Press, 2007, 236 p.
2. **Holthuijsen L., Booij N., Ris R., Haagsma I.G., Kieftenburg A., Kriezi E.E.** SWAN Cycle III version 40. 51 User Manual. Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, The Netherlands, 2009, 67 p
3. **Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Чернышева Е.С., Колесов А.М.** О шторме на Черном море в ноябре 2007 г. Москва: Российский речной регистр, 2009. 35 С.
4. Типовые поля ветра и волнения Черного моря. Под ред. **Альтмана Э.Н. и Матушевского Г.В.** Севастополь: СО ГОИН, 1987. 116 С.
5. **Kalnay E., Kanamitsu M. et al.** The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1996, p. 437-471.
6. **Kanamitsu, M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S.-K.H., Niino, J., Fiorino M., Potter G.** NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, No 11, p. 1631-1643.
7. WMO Guide to wave analysis and forecasting. WMO (Series); no. 702. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, 1998. 159 p.
8. **Дивинский Б.В., Косьян Р.Д., Подымов И.С., Пушкарев О.В.** Экстремальное волнение в северо-восточной части Черного моря в феврале 2003 г. Океанология, т. 43, №6, С. 948-950.
9. Регистр СССР. Ветер и волны в океанах и морях. Справочные данные. Ред. Давидан И.Н. и др. Л., Транспорт, 1974. 359 с.
10. **Демченко Р.И., Железняк М.И.** Гиперболическая аппроксимация трансформации волн на течениях прибрежной зоны Прикладная гидромеханика, 2002, т.4, №2, с. 23-29
11. **Демченко Р., Коломиец П., Сорокин М.** Моделирование трансформации волн в прибрежной зоне шельфа с помощью полу-спектральной модели H-WAVE-S. Тезисы конференции "Математическое и имитационное моделирование систем. МОДС '2010", 2010.

---

Дикий Павел Васильевич, Украинский центр экологических и водных проектов Академии технологических наук Украины, 03187, Украина, г. Киев, проспект Глушкова, 42, e-mail: pasha.dik@gmail.com

Дзюба Наталья Николаевна, Украинский центр экологических и водных проектов Академии технологических наук Украины, 03187, Украина, г. Киев, проспект Глушкова, 42, e-mail: natadz@mail.ru

Железняк Марк Иосифович, Украинский центр экологических и водных проектов Академии технологических наук Украины, 03187, Украина, г. Киев, проспект Глушкова, 42, e-mail: zheleznyak.m@gmail.com

Сорокин Максим Викторович, Украинский центр экологических и водных проектов Академии технологических наук Украины, 03187, Украина, г. Киев, проспект Глушкова, 42, e-mail: maxim.sorockin@gmail.com

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕРЕГОВЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ ПО БЕРЕГОЗАЩИТЕ ИМЕРЕТИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

*И.Г. Кантарджи, К.П. Мордвинцев*

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», г. Москва, РОССИЯ

**АННОТАЦИЯ:** Уникальность природных процессов на берегах Имеретинской низменности требует применения математического моделирования береговых процессов, как средства обоснования инженерных решений по берегозащите. На основе такого моделирования можно решить основные вопросы ремонтных пополнений пляжа.

**Ключевые слова:** Имеретинская низменность, берегозащита, математическое моделирование, волны, течения, литодинамические процессы, ремонтные пополнения пляжа.

## MATHEMATICAL MODELING OF THE COASTAL PROCESSES TO SUPPORT THE SHORE PROTECTION OF THE IMERETINSKY LOWLAND

*Igor G. Kantardgi, Konstantin P. Mordvincev*

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, RUSSIA

**ABSTRACT:** The coastal protection measures for Imeretinsky lowland should be based on the results of the mathematical modeling of the coastal processes, because the processes here are specific. The modeling should be based also for design of the repair supplements of the beaches.

**Keywords:** Imeretinsky lowland, shore protection, mathematical modeling, waves, currents, lytodynamic processes, beach repair supplements.

При решении задач защиты от волновой эрозии берега Имеретинской низменности важно учитывать уникальные особенности этого побережья. Эти особенности связаны, не только с природными процессами, но и, к сожалению, с неудачными действиями человека. Баланс наносов на рассматриваемом участке берега был нарушен в середине XX века, когда началось изъятие значительных объемов гравия и гальки с пляжа и из русла р. Мзымта для строительных нужд. В результате приток наносов уменьшился, питание пляжей сократилось, и берега начали отступать. Так, за период 1959-1975 годов к северу от мыса Константиновский урез отступил на 10-15 м. Кроме того, из-за недостаточного

количества материала, верховья каньонов стали более интенсивно врезаться в береговой склон и приближаться к берегу. В этом плане наибольшую опасность представляют каньоны Новый и Константиновский. Верховья подводных каньонов активно перехватывают песчано-галечниковый материал. На бортах каньонов, особенно в зоне выклинивания илистых песков, возможно, протекают подводно-оползневые смещения с образованием на них ступенчатого и бугристо- западинного микрорельефа. Участок берега от р. Мзымта до м. Константиновский имеет крайне сложный рельеф подводного склона, обусловленный наличием подводного каньона. Каньон вплотную

подходит к берегу: 10-метровая изобата с южной стороны мыса, находится на расстоянии 40 м от уреза, а с северной – на расстоянии 170 м от уреза.

Мысообразный выступ берега – мыс Константиновский (азимут от 137 до 113 градусов) имеет продолжение в виде гребня на подводном склоне, круто обрываясь в каньон с северной и южной стороны на глубинах 5-6 м (уклон от уреза до 6-метровых глубин – 0,15, в южном отвершке каньона на глубинах 6-20 м – 0,42, на глубинах 20-40 м – 0,36). Сам мыс является сложной аккумулятивной формой, возникновение которой было обусловлено взаимодействием потоков наносов от северо-западного и юго-восточного направлений.

Вершина каньона Новый максимально приближена к берегу. Его бровка выражена в рельефе с глубин 7-8 м. Русло каньона относительно прямолинейное. Фронтальная часть каньона имеет ширину около 400 м. По данным повторных обследований, бровка каньона Новый продвигается в сторону берега со средней скоростью 1,0 м/год. Основной причиной этого является физическое разрушение коренного ложа, сложенного рыхлыми породами (древними галечниками и глинисто-валунными отложениями). Каньон оказывает все возрастающее влияние на баланс пляжных и донных наносов, что обуславливает образование вогнутости и размыв пляжа с ЗСЗ оконечности мыса Константиновский.

Берег у мыса Константиновский меняет ориентировку почти на 60° и за ним начинается вогнутость Имеретинской бухты длиной более 2,5 км. Каньон Константиновский зарождается напротив мыса на глубине около 8 м и имеет ширину в головной части около 600 м, его верховья сильно расчленены. В русле каньона сплошные покровы гальки прослежены до глубины 100 м. На большей площади дно прикрыто мелким песком и илом.

На рассматриваемом участке побережья имеется галечниковая пляжная полоса, сформированная за счет твердого стока впа-

дающих рек, в основном за счет твердого стока р. Мзымта. Твердый сток р. Мзымта в естественных условиях, до массового изъятия грунта из русла реки, формировал два вдольбереговых потока разной мощности, меньшая часть (ориентировочно 6 тыс.м<sup>3</sup> в год) уходила на северо-запад, а большая часть (35-40 тыс.м<sup>3</sup> в год) подпитывала пляжи до устья р. Псоу.

Твердый сток рек данного региона характеризуется как взвешенными, так и влекомыми наносами. Сток взвешенных наносов более устойчив во времени и достигает своих локальных максимумов на пиках паводков. Однако взвешенные наносы в силу своей незначительной гидравлической крупности не принимают участия в пляжеобразовании. Факелы выбросов взвешенных наносов распространяются в море на несколько миль, постепенно теряя мутность, и переносятся вдольбереговыми течениями на большие расстояния, постепенно осаждаясь, они формируют илы шельфа и подводного склона. В настоящее время твердый сток реки Мзымта значительно снизился за счет массовых заборов материала из русла реки. Современный твердый сток реки Мзымта можно оценить в 20-45 тыс.м<sup>3</sup> в год.

Поведение влекомых (крупных) наносов в значительно большей степени зависит от транспортирующей энергии потока реки (расхода воды и скоростного режима). Этот вид наносов участвует в создании пляжной полосы. Транспорт наносов вдоль берега осуществляется за счет энергии волн. Общее результирующее направление потока – на юг. Часть наносов теряется в результате истирания, часть перехватывается каньонами и безвозвратно теряется.

Ширина песчано-галечных пляжей составляет от 7 до 35 м. В настоящее время происходит активная абразия морского берега со скоростью отступления берега в районе улицы Голубой (вблизи каньона Новый) 1,25 – 1,7 м/год.

Берега в Имеретинской низменности в целом приглубые. Поэтому штормовые волны лишь в малой степени теряют свою энергию

при подходе к берегу, что определяет высокую интенсивность лито- и морфодинамических процессов. Во время сильных штормов происходит почти полная переработка поверхности пляжа. Слагающий его материал дифференцирован по крупности. В прирезовой части, где располагается береговой вал, концентрируются гравий и галька. В средней части пляжа доминирует галька различного размера, а в верхней его части преобладают пески и гравий.

Вдольбереговые течения, создаваемые косо подходящими штормовыми волнами, по расчетным оценкам, достигают скоростей более 2 м/с. Ветровой нагон в силу приглубости берега незначителен.

Наибольшей силы достигают волнения ЮЗ румба. Для штормов повторяемостью 1 раз в 50 лет средняя высота волн в шторме на глубокой воде может составлять около 5,0 м и средний период волн около 10,0 с.

Вторая особенность площадки строительства связана с влиянием оградительных сооружений Мзымтинского порта. Порт располагается на северо-западном крае рассмат-

риваемого побережья. Оградительные молы порта выходят на глубины более 10 м и, таким образом, целиком перекрывают вдольбереговые потоки гравия и гальки, которые концентрируются в прирезовой полосе. По существу, полностью прекращается питание пляжей гравийно-галечным материалом, поступающим из устья р. Мзымты. Изъятие из бюджета наносов такого важного источника, очевидно, должно негативно отразиться на состоянии рассматриваемого побережья. И требует выполнения берегозащитных мероприятий.

В настоящее время разработаны и частично реализованы два варианта проекта берегоукрепления. В обоих случаях применяется составной откос, включающий галечный пляж.

Запроектированные и строящиеся берегозащитные сооружения включают в себя галечный пляж шириной в надводной части 50 м, прислоненный к ж/б ростверку (уступу) на сваях, затем укрепленный ж/б блоками или плитами откос, заканчивающийся набережной (рис.1)

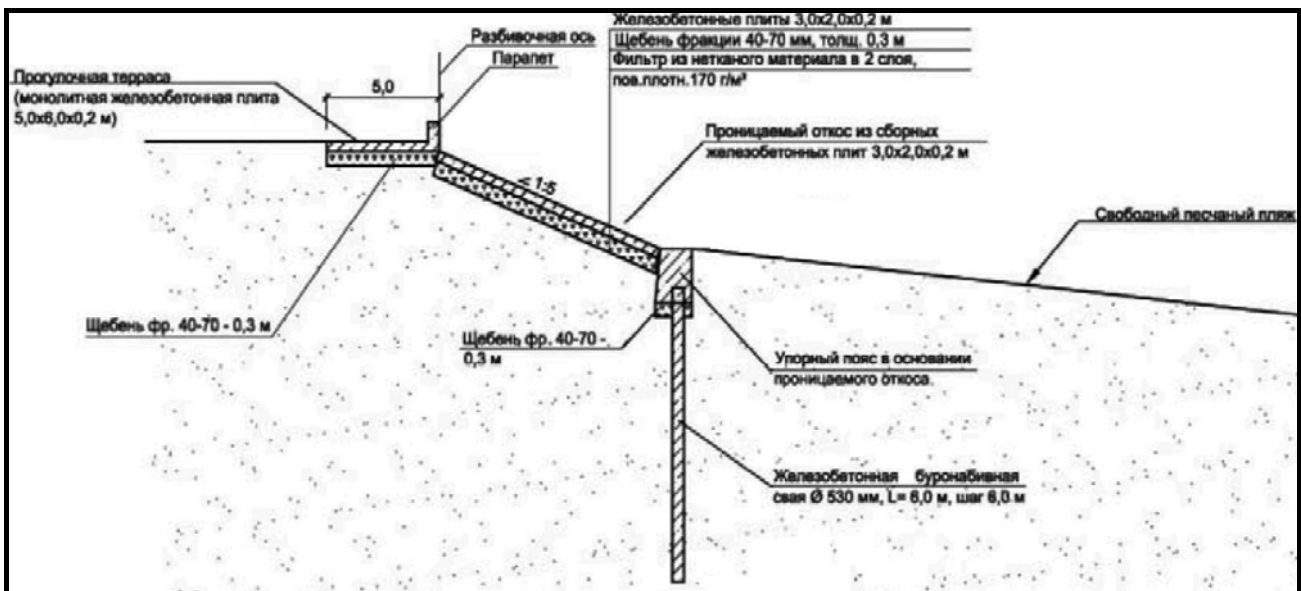


Рис. 1. Схема берегоукрепления Имеретинской низменности



Рис.2. Крепление откоса проницаемыми блоками

В первом варианте [1] (протяженность 1846 погонных метров от ПК15) надводный профиль свободного искусственного пляжа достраивается до ширины 50 м с уклонами 0,05. Расчетная отметка верхней зоны пляжа составляет 4,5 м (БС). Верхняя зона пляжа шириной 5,0 м крепится монолитными железобетонными плитами с размерами 5,0x6,0x0,2 м и оформляется как прогулочная терраса с парапетным ограждением.

С отметки 4,5 м до 2,5 м береговой откос принят с заложением 1:5 и крепится сборными железобетонными блоками с размерами 1,0x1,0x1,0 м проницаемого типа (рис.2). В основании проницаемого откоса предусматривается упорный пояс состоящий из буронабивных свай диаметром 720 мм, длиной 6,0 м, погружаемых с шагом 2,0 м и монолитного железобетонного ростверка.

Для схода к воде и в пляжные зоны рекреации с прогулочной террасы, предусмотрены лестничные сходы и пандусные спуски. Проект «Инженерная защита территории Имеретинской низменности, включая берегоукрепление (проектные и изыскательские работы, строительство). II этап: Берегоукре-

пление Имеретинской низменности (п.69 программы)» предлагает устройство берегоукрепления Имеретинской низменности на участке от ПК52 до ПК80, за исключением участка инвестора ОАО «Пансионат отдыха», с увязкой с берегоукреплением территории базы отдыха «Черноморец» [2]. Проект предусматривает сооружение берегозащитной дамбы протяженностью 1861,45 погонных метров. Передний откос дамбы будет включать свободный гравийно-галечниковый пляж, ширина которого от уреза до отметки +2,5 м должна составить 50 м. Выше на поверхности откоса до отметки +4,5 м будут укладываться железобетонные плиты, а по верху дамбы будет проложена прогулочная терраса. Нижним краем плиты будут опираться на упорный пояс, закрепленный на сваях.

В настоящее время ширина пляжа на большей части побережья меньше 50 м. Поэтому для достройки его до требуемой ширины понадобится произвести отсыпку значительных объемов материала, в том числе и на подводный склон.

Таким образом, предлагаемая конструкция берегозащитного сооружения является ди-

намической, так как пляж в составе защищаемого откоса может деформироваться под воздействием волн, особенно во время сильных штормов. При деформации пляжа возможно оголение плиты уступа (ростверка) со стороны пляжа, с увеличением волновых нагрузок на него и возможными подвижками сооружения. В свою очередь, это может приводить к подвижкам крепления откоса. При несвоевременном выявлении и принятии мер (ремонтные пополнения пляжа) это может привести в результате к существенным разрушениям конструкции.

В настоящее время сохранение пляжа в составе строящихся берегозащитных сооружений является основной проблемой берегоукрепления Имеретинской низменности. При этом наиболее сложной является ситуация на северо-западной части побережья из-за влияния построенных оградительных сооружений морского порта.

По прогнозам МГСУ [3] в районе ПК 18 благодаря блокировке портом твердого стока р. Мзымты создается дополнительный дефицит

материала около 8 тыс. м<sup>3</sup>/год. С учетом стока в каньон Новый общий дефицит превысит 20 тыс. м<sup>3</sup>/год. В результате берег на участке 400-метровой длины будет отступать со скоростью 5 м/год.

Дефицит материала (35-40 тыс. м<sup>3</sup>/год) должен ощущаться и в зоне между ПК 22 и ПК 30 вследствие дивергенции потока и ухода материала в каньон Константиновский. Берег здесь будет отступать со скоростью 3-4 м/год.

Для сохранения пляжей на обозначенных проблемных участках потребуется подсыпка галечного материала в объеме дефицита. На 400-метровом участке в районе ПК 18 следует подсыпать около 50 м<sup>3</sup> на метр длины берега в год, а на втором участке длиной около километра – 30-40 м<sup>3</sup> м<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>.

На рис.3 показано современное состояние берега в районе ПК 18, образовавшееся в результате неполного выполнения проекта (пляж не был досыпан до проектной ширины) и процессов размыва, вызванных влиянием порта.



Рис.3. Берег в районе ПК18 (фото МГСУ, июль 2011), пляж размыв значительно, ростверк оголен полностью

Разработка инженерных решений по берегозащите для берегового участка такой сложности, как Имеретинка, должно основываться на описании и прогнозе береговых процессов. Такое описание и возможности прогноза дает математическое моделирование береговых процессов. Целью выполненных работ по моделированию [3] было «...прогностические расчеты полей волн, течений и характеристик литоморфодинамических процессов в прибрежной зоне Имеретинской низменности в междуречье р. Мзымта и р. Псоу для расчетных штормов в существующих условиях и для предлагаемых вариантов инженерной защиты побережья на основе комплекса современных численных двумерных и трехмерных моделей.»

Исследования проводились параллельно тремя модельными комплексами. Это позволило получить более полные результаты по исследуемым процессам, так как исследования по различным моделям дополняли друг друга.

Уникальность моделируемых процессов потребовала «настройки» применяемых моделей, в том числе сравнения результатов моделирования с данными измерений или наблюдений, в тех случаях, когда эти данные удалось получить.

Математическое моделирование береговых процессов включало в себя решение следующих задач:

- оценка устойчивости пляжей и влияния Мзымтинского порта на литодинамические процессы в береговой зоне Имеретинской низменности;
- определение режимных характеристик ветра и волнения в открытом море;
- параметры волнения и штормового нагона на входе в береговую зону;
- моделирование трансформации волн на мелководье;
- расчет генерируемых волнами двумерных течений, переноса наносов

и переформирования дна и пляжей, для существующих условий и при наличии сооружений инженерной защиты;

- структура прибрежных течений, генерируемых штормами;
- численное моделирование трехмерной структуры течений в районе глубоководных каньонов;
- численное моделирование литодинамических процессов на участке сооружений инженерной защиты Имеретинской низменности;
- влияние оградительных сооружений порта на динамику берега, смещения береговой линии;
- моделирование устойчивости берегозащитных сооружений Имеретинской низменности с учетом фактических и прогнозируемых деформаций берегового откоса.

Результаты математического моделирования позволяют решать различные задачи развития и сохранения берега. В том числе первоочередную задачу сохранения берега и берегоукрепительных сооружений Имеретинской низменности - разработку проекта ремонтных пополнений берегоукрепления. Проект должен включать в себя, естественно, определение источников материала для выполнения ремонтных отсыпок. С учетом значительных объемов отсыпок этот вопрос принципиально важен.

Одним из путей решения этой проблемы является восстановление литодинамического баланса путем переброски материала вокруг порта с забором его из устьевого взморья р.Мзымты и отсыпками в тело берегоукрепительного сооружения на участках размыва.

В годы с малой штормовой активности в устье Мзымты обычно происходило накопление галечных наносов. Во время сильных штормов часть из них уходило в Мзымтинский каньон. В настоящее время также происходит накопление твердого материала в районе корня западного мола порта – Рис.4.



*Рис.4. Современное накопление материала у западного мола порта  
(фото МГСУ, июль 2011)*

Организация байпасинга материала со взморья р.Мзымты на пляж восточнее порта не противоречит существующему законодательству РФ в области охраны водных ресурсов, так как грунт выбирается не из русла реки.

Вопрос в том какие объемы ежегодно можно забирать из преустьевоего взморья Мзымты, чтобы не вызвать и здесь размыв берега и приближения к нему верховьев Мзымтинского каньона. Очевидно, можно отсюда брать только те объемы, которые не вызовут отрицательных последствий и ежегодно могут восполняться стоком влекомых наносов Мзымты, а недостающие объемы доставлять из других альтернативных источников.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рабочий проект «Инженерная защита территории Имеретинской низменности (включая проектно-изыскательские работы). 2 этап. Берегоукрепление», Том 3 «Инженерная защита береговой зоны Имеретинской низменности», книга 1 «Пояснительная записка», ООО «ТЭК-ПРО», 2009.
2. Рабочая документация по объекту «Инженерная защита территории Имеретинской низменности, включая берегоукрепление (проектные и изыскательские работы, строительство). II этап: Берегоукрепление Имеретинской низменности» (п.69 Программы), ООО «НПО «Мостовик», 2011.

Математическое моделирование береговых процессов для обоснования инженерных решений по берегозащите Имеретинской низменности

3. Математическое моделирование волн, течений и литодинамических процессов на участке сооружений инженерной защиты Имеретинской низменности, Адлерский район, г. Сочи, заключительный отчет по Договору № К.223-11, МГСУ, М., 2011.

---

Кантаржи Игорь Григорьевич, доктор технических наук, профессор кафедры гидротехнических сооружений, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,  
тел/факс: +7 (495) 781-80-07  
e-mail: kantardgi@yandex.ru

Мордвинцев Константин Петрович, кандидат технических наук, начальник научно-технического управления, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,  
тел/факс: +7 (499) 287-49-14;  
e-mail: ntuiinfo@mgsu.ru

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОГО РЕЖИМА И ПРОЦЕССОВ РАЗМЫВА ХАРАКТЕРНОГО УЧАСТКА БЕРЕГОУКРЕПЛЕНИЯ ИМЕРЕТИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

*И.Г. Кантарджи, Н.В. Шунько*

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», г. Москва, РОССИЯ

**АННОТАЦИЯ:** В рамках договора между ООО «НПО «Мостовик» и ГОУ ВПО МГСУ «Гидравлическое моделирование воздействия на конструктивные решения берегозащиты на участке ПК52-ПК53 по проекту «Инженерная защита Имеретинской низменности. Берегоукрепление» (2 этап)» ведутся экспериментальные работы по физическому моделированию участка берегозащиты, ход выполнения которых, представлен в данной статье.

**Ключевые слова:** Имеретинская низменность, инженерно-геологические условия, берегозащита, волновой режим, длина волны, физическое моделирование.

## STUDY OF THE WAVES AND EROSION FOR THE TYPICAL SITE OF THE SHORE PROTECTION OF IMERETINSKY LOWLAND

*Igor G. Kantardgi, Natalia V. Shunko*

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, RUSSIA

**ABSTRACT:** Within the framework of the contract between ООО «NPO «Mostovik» and Moscow State University of Civil Engineering «Hydraulic modeling of influence on constructive decisions coast protection on site PK52-PK53 under the project «Engineering protection of Imeretinsky lowland. Coast protection» (2 stage)» experimental works on physical modeling a site coast protection which course of performance, is submitted in this paper are conducted.

**Key words:** Imeretinsky lowland, engineering-geological conditions, coast protection, wave mode, wave length, physical modeling.

В Отраслевой научно-исследовательской лаборатории морских нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений ГОУ ВПО МГСУ ведутся экспериментальные работы по Договору с ООО «НПО «Мостовик» по теме: «Гидравлическое моделирование воздействия на конструктивные решения берегозащиты на участке ПК52-ПК53 по проекту «Инженерная защита Имеретинской низменности. Берегоукрепление» (2 этап)». Основанием для проведения работ является: Программа строительства Олимпийских объектов и Постановление Правительства Российской Федерации от 27 июля 2009 № 613.

Местонахождение объекта: Адлерский р-н, г. Сочи, Имеретинская низменность в между-речье Мзымта-Псоу.

Целью данной работы является исследование волнового режима и процессов размыва характерного участка берегозащиты в рамках проекта «Инженерная защита Имеретинской низменности. Берегоукрепление».

Техническим заданием к Договору предусмотрен следующий состав работ:

- сбор и анализ исходной информации;
- разработка программы и методики проведения работ, согласованных с Заказчиком;

- изготовление модели, подготовка и наладка системы измерений;
- исследование волнового режима и процессов размыва опасного участка берегозащиты между ПК51 и ПК52;
- анализ проведенных исследований, сравнение с данными математического моделирования и мониторинга сооружений.

Работы выполняются по согласованной с Заказчиком программе и в соответствии с действующими нормативными документами.

Эксперименты ведутся методом физического моделирования в мелководном бассейне лаборатории ОНИЛ МНГС, позволяющем, благодаря своим значительным размерам в плане 30 м × 30 м и глубиной 1,1 м, выбирать масштаб, максимально приближенный к реальным условиям.

Работы по подготовке мелководного бассейна к строительству модели исследуемого участка берега проводились с использованием современной строительной техники и привлечением сотрудников и студентов Кафедры Гидротехнических сооружений.

Для изучения взаимодействия расчетного волнения и размыва участка берегозащиты, гидравлическая модель была построена в масштабе 1:25 с тщательным соблюдением всех геометрических параметров физической модели натурному объекту, обеспечением подбора волнового режима, максимально приближенному к существующему и воссозданием особенностей рельефа дна в данном районе.

В основание модели был отсыпан песок, который после планировки уплотнялся по всей площади поверхности.

После уплотнения песчаного грунта производилась окончательная плано-высотная юстировка поверхности модели.

Плановое положение модели в волновом бассейне устанавливалось в зависимости от генерации волнопродуктором устойчивых во времени параметров волн.

В соответствии с практикой проведения модельных исследований такого рода, устойчивого волнового режима можно достичь при

соблюдении условия, что расстояние между щитом волнопродуктора и моделью должно быть равно не менее пяти максимальных длин волн. Нормальная работа волнопродуктора, а соответственно и устойчивые параметры волн, обеспечиваются оптимальной глубиной воды в бассейне. Для проведения экспериментов в настоящей работе она была принята, в соответствии с исходной документацией [1, 2], равной 0,6 м (рис. 1, рис. 2). На данный момент:

- построена рабочая модель участка берега;
- разработана методика и программа проведения экспериментальных исследований с учетом условий эксплуатации натурного объекта;
- произведен монтаж и отладка информационно-измерительной и регистрирующей аппаратуры (компьютеры, модули связи и др.);
- выполнена оценка работы информационно-измерительной и регистрирующей системы;
- изготовлены и смонтированы ограждающие панели из органического стекла для формирования проектной волны в волновом канале и фиксации процесса экспериментальных исследований на цифровую видеозаписывающую аппаратуру;
- проводятся методические эксперименты (рис. 3, рис. 4, рис. 5).



Рис. 1. Наполнение бассейна водой до проектного уровня



Рис. 2. Модель участка берегозащиты в заполненном водой бассейне



Рис. 5. Отладка информационно-измерительной и регистрирующей аппаратуры



Рис. 3. Установка ограждающих панелей из органического стекла

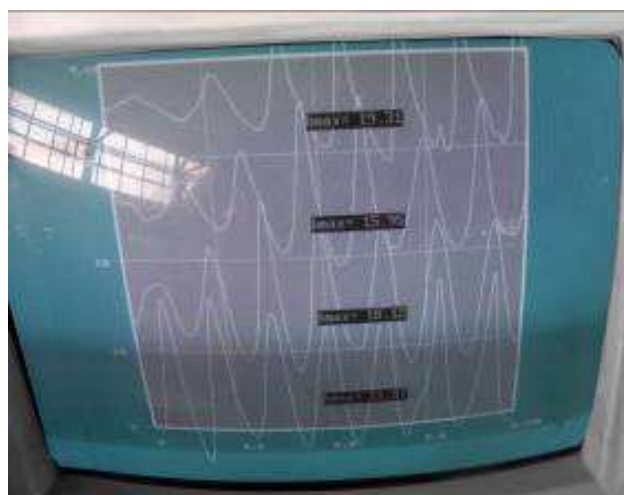


Рис. 6. Зафиксированный сигнал с волнографов



Рис. 4. Подготовленный для экспериментов волновой канал

Измерения параметров волн, в процессе экспериментов, осуществляется инструментально при помощи емкостных волнографов, сигнал с которых по кабельной системе поступает на персональный компьютер, где осуществляется обработка результатов измерений в специально разработанной программе (рис. 6).

Экспериментальные исследования на начальном этапе (рис. 7), выявили образование размыва в нижней части модели с выносом большей части объема исходной отсыпки на глубину (рис. 8, рис. 9).

После анализа результатов методических экспериментов и уточнения методики проведения экспериментальных исследований, будет проведена основная серия экспериментов, позволяющая получить окончательную картину взаимодействия расчетного волнения и размыва участка берегозащиты.



*Рис. 7. Заплеск волн на гравийно-галечниковый откос*



*Рис. 8. Общий вид пляжа и откоса по окончании эксперимента*



*Рис. 9. Сформировавшийся размыв модели*

Следует отметить, что мелководный бассейн лаборатории глубиной 1 м позволяет проводить крупномасштабные исследования существующих и проектируемых сооружений, моделировать защищенность акваторий проектируемых портов от проникающего ветрового волнения, заносимость подходов ка-

налов и водных путей (изучение формирования наносов в прибрежной зоне), исследовать русловые процессы при строительстве, эксплуатации и аварийных ситуациях различных гидротехнических сооружений. Имеющаяся в наличии экспериментальная база в виде трех гидроволновых лотков, один из которых - длинноволновой, глубиной 2 м, шириной 2 м и длиной 80 м, и глубоководного бассейна глубиной до 5 м, оборудованных стационарными и передвижными волнопродукторами, дает возможность выполнения огромного комплекса научных работ, связанных с исследованием различных гидротехнических задач.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Инженерная защита территории Имеретинской низменности, включая берегоукрепление (проектные и изыскательские работы, строительство) II этап: берегоукрепление Имеретинской низменности (п. 69 Программы)». Устройство берегоукрепления Имеретинской низменности на участке от ПК 52 до ПК 70. Рабочая документация. Проект организации строительства. Шифр: 80-12.2010-ТЭКПРО-1.5-ПОС. «НПО «Мостовик». Москва, 2011г.
2. «Инженерная защита территории Имеретинской низменности, включая берегоукрепление (проектные и изыскательские работы, строительство) II этап: берегоукрепление Имеретинской низменности (п. 69 Программы)». Устройство берегоукрепления Имеретинской низменности на участке от ПК 52 до ПК 70. Рабочая документация. Пояснительная записка. Шифр: 80-12.2010-ТЭКПРО-1.1-ПЗ. «НПО «Мостовик». Москва, 2011г.

---

Кантаржи Игорь Григорьевич, доктор технических наук, профессор кафедры гидротехнических сооружений, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, тел/факс: +7 (495) 781-8007

e-mail: kantardgi@yandex.ru

Шунько Наталья Владимировна, Отраслевая научно-исследовательская лаборатория морских нефтегазо-промысловых гидротехнических сооружений, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26,  
e-mail: natshunko@rambler.ru.

Igor G. Kantardgi, Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Shosse, 129337, Moscow, RUSSIA, e-mail: kantardgi@yandex.ru.

Natalia V. Shunko, Research Marine Laboratory, Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Shosse, 129337, Moscow, RUSSIA,  
e-mail: natshunko@rambler.ru

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКАТА ВОЛН И БЕРЕГОВОГО РАЗМЫВА ИМЕРЕТИНСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ВО ВРЕМЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ШТОРМОВ

*С.Л. Кивва, М.И. Железняк, П.С. Коломиец, М.В. Сорокин*

Украинский центр экологических и водных проектов Академии технологических наук Украины,  
г. Киев, УКРАИНА

**АННОТАЦИЯ:** Для моделирования гидродинамических и литодинамических процессов на побережье Имеретинской низменности использовался комплекс двумерных численных моделей COASTOX – MORPHO. Приведено сравнение рассчитанной и наблюдаемой зоной наката для экстремального ноябрьского шторма 2007 года. Моделируется накат волн различной обеспеченности на проектируемую берегозащитную дамбу и трансформация пляжа в зоне наката.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, уравнения мелкой воды, волновой накат, эрозия берега, гидродинамика.

## MATHEMATICAL MODELING OF WAVE RUNUP AND EROSION OF IMERETINSKY COAST DURING EXTREME STORMS

*Sergey L. Kivva, Mark I. Zheleznyak, Pavel S. Kolomiets, Maxim V. Sorokin*

Ukrainian Center of Environmental and Water Projects, Kiev, UKRAINE

**ABSTRACT:** COASTOX – MORPHO model is used to simulate hydrodynamic and lithodynamic processes for the Imeretinsky coast. The calculated runup height during the extreme November 2007 storm is compared with the given. Maximum runup height on the designed coastal protection dam and beach transformation in runup zone for extreme storms of different probability of exceeding are simulated.

**Key words:** Mathematical modeling, shallow water equations, wave runup, coastal erosion, hydrodynamic.

### ВВЕДЕНИЕ

Участок морского берега Нижне-Имеретинской низменности от р.Мзымта до р.Псоу имеет сложный рельеф подводного склона. Морской склон изрезан эрозионными оползневыми подводными каньонами, из которых наибольшее влияние на динамику литодинамических процессов берега оказывают каньоны Мзымтинский, Джарский, Новый и Константиновский. На этом участке побережья бровка свала глубин приближена к берегу на расстояние до 50-400 м. Верховья каньонов зарождаются на глубинах 5-12 м, а средние

уклоны тальвега каньона в интервале глубин 20-40 м в пределах 0.25-0.4.

Течения западной части Черного моря в этом районе взаимодействуют с прибрежными течениями, генерируемыми ветром, волнами и устьевыми речными потоками, что наряду с дифракционно-рефракционной трансформацией волн на особенностях донного рельефа и течениях формируют исключительно неоднородные поля волновых характеристик и прибрежных течений. Под их воздействием происходит формирование неоднородных полей наносов, соответствующих зон интенсивных размывов, появляются локальные зоны усиления волновых гидродинамических

нагрузок на прибрежные гидротехнические сооружения.

На побережье Имеретинской низменности планируется сооружение берегозащитной дамбы протяженностью 5 километров, по верху которой будет проложена прогулочная терраса. Расчетная отметка верха защитной дамбы составляет 4.5 м (БС).

Неоднородность донного рельефа, изрезанного глубоководными каньонами, определяет особенность формирования волнового режима на данном участке. Так, наиболее опасными для побережья вблизи каньона Новый являются шторма южных и юго-западных направлений, которые подходят к берегу вдоль оси каньона [1]. В рамках проекта по моделированию гидродинамического и литодинамического режима прибрежной зоны до и после возведения берегозащитных сооружений трансформация волновых полей ветровых волн на глубоководной части акватории и вблизи берега до уреза исследовалась на основе моделей SWAN и HWAVER [1]. Важной проблемой моделирования наката экстремальных волн на берегозащитную дамбу и размыва гравийно-галечникового пляжа в зоне заплеска под влиянием динамики заплескивающегося потока. Моделирование этих процессов проводилось на основе модели COASTOX-MORPHO [2,3], которая может использоваться как для расчета вдольбереговых течений, генерируемых волнами, когда волны рассматриваются как процессы подсеточного масштаба, оказывающие воздействие на гидродинамику только через напряжения (через радиационные напряжения и донное трение) [3,4], так и для непосредственного описания уравнениями мелкой воды процессов наката волн на берег [2].

## 1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ COASTOX-MORPHO

Модель COASTOX-MORPHO принадлежит к комплексам двумерных моделей такого класса как MIKE-21 (Дания) [5], M2D (США) [6], и состоит из подмоделей, описывающих движе-

ние воды, транспорт взвешенных и влекомых нано-сов, процессы взмучивания/осаждения, транспорт загрязнителей в растворимой форме, на взвешенных и влекомых наносах и загрязнение верхнего слоя земли.

### 1.1. Уравнения движения воды.

Двумерные уравнения движения воды получаются интегрированием трехмерных уравнений Навье-Стокса по глубине потока с использованием кинематических граничных условий. Эти уравнения включают уравнение неразрывности и два уравнения сохранения импульса. Они могут быть записаны в следующей форме:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i h) = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(u_i h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j u_i h) + gh \frac{\partial \xi}{\partial x_i} = \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D_j \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i h) \right) - \tau_{bi} + \tau_{wi} + \tau_{Si}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $t$  - время;  $x_i$  - пространственные координаты;  $h = \xi - \eta$  - глубина потока;  $u_i$  - скорость течения в направлении  $x_i$ -координаты;  $\xi(x,y,t)$  - уравнение свободной поверхности жидкости;  $\eta(x,y,t)$  - уравнение поверхности земли;  $g$  - ускорение свободного падения;  $\tau_{Si}$  - волновое напряжение в направлении  $x_i$ -координаты;  $\tau_{wi}$  - поверхностное ветровое напряжение;  $D_j$  - коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости является функцией волновых характеристик.

### 1.2. Уравнение переноса взвешенных наносов

Перенос взвешенных частиц потоком жидкости описывается следующим конвективно-диффузионным уравнением

$$\frac{\partial(hS)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i hS) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( hD_{Si} \frac{\partial S}{\partial x_i} \right) - q^s + q^b,$$

где  $S$  - концентрация взвешенных наносов;  $D_{Si}$  - коэффициент горизонтальной дисперсии;  $q^s$  и  $q^b$  - скорости осаждения и взмучивания соответственно.

**1.3. Эрозия/осаждение взвешенных частиц.** Изменение поверхности земли описывается уравнением

$$\rho_b(1-\phi) \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} + q^s - q^b,$$

где  $\phi$  - пористость грунта;  $\rho_b$  - плотность скелета грунта;  $q_{bi}$  - транспорт влекомых наносов в направлении  $x_i$ -координаты. Скорости взмучивания и осаждения определяются соотношениями

- для некогезионных наносов

$$q^s = \max\{0, w_0(S - S^*)\};$$

$$q^b = \max\{0, E_r w_0(S^* - S)\}$$

- для когезионных наносов
- 

$$q^s = \max\left\{0, w_0 S \left(1 - \frac{\tau}{\tau_d}\right)\right\}$$

в случае осаждения и

$$q^b = \max\left\{0, M \left(\frac{\tau}{\tau_e} - 1\right)\right\}$$

в случае взмучивания, где  $S^*$  - равновесная концентрация взвешенных наносов;  $w_0$  - скорость осаждения взвешенных частиц;  $E_r$  - коэффициент взмучиваемости;  $\tau_d, \tau_e$  - критические касательные напряжения для осаждения и взмучивания соответственно;  $\tau$  - донное касательное напряжение;  $M$  - экспериментально определяемая константа.

Для определения транспорта влекомых наносов использовалась формула Camenen-Larson [8]:

$$\frac{\tilde{q}_b}{\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}} = 12\sqrt{\theta_c} \theta_{cw,m} \exp\left(-4.5 \frac{\theta_{cr}}{\theta_{cw}}\right),$$

где  $\tilde{q}_b$  - объемный транспорт влекомых наносов в единицу времени и на единицу ширины потока;  $s = \frac{\rho_b}{\rho}$  - удельная плотность;

$d_{50}$  - средний диаметр влекомых наносов;  $\theta_{cr}$  - критический параметр Шилда (Shield);  $\theta_{cw}$  и  $\theta_{cw,m}$  - максимальный и средний параметры Шилда для течений с волнами.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКАТА ШТОРМОВЫХ ВОЛН НА ПЛЯЖИ И ИНЖЕНЕРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

На побережье Имеретинской низменности планируется сооружение берегозащитной дамбы протяженностью 5 километров. Передний откос дамбы будет включать свободный гравийно-галечниковый пляж, ширина которого от уреза до возвышения 2.5 м должна составить 50 м. Выше, на поверхности откоса до отметки 5 м будут укладываться железобетонные плиты, а по верху дамбы будет проложена прогулочная терраса. Нижним краем плиты будут опираться на упорный пояс, закрепленный на сваях.

Целью моделирования являлась оценка наката экстремальных волн на берегозащитную дамбу. Для этого выбирались четыре шторма: январский шторм 1993 года, февральский 2003 г., ноябрьский 2007 г. и декабрьский 2009 г. Область моделирования покрывалась равномерной прямоугольной сеткой с шагами 8×4 м. На нижней границе задавалось волновое поле, рассчитанное по модели H-WAVE. Моделировался 200 секундный промежуток наката волн. Результаты моде-

лирования наката волн на берег приведены на рис.1.

На рис.3. показаны максимальные уровни поверхности воды за 200 секундный промежуток наката волн в сечениях для различных штормов. Расположение сечений и соответствующие номера даны на рис.2. Анализ результатов показывает, что заплеск воды на верхней кромке дамбы для сечения №1 будет

2.90 м для шторма 01.1993 г., 0.71 м - для шторма 11.2007 г. и 0.66 м - для шторма 12.2009 г. В сечении №2 эти величины будут: 0.59 м для шторма 01.1993 и 0.32м для шторма 11.2007 г. В сечении №3 имеем: 1.14 м для шторма 01.1993 г. и 4 см для шторма 11.2007 г. В сечении №4: 0.73 м для 01.1993 г. и 0.56 м для 11.2007 г.

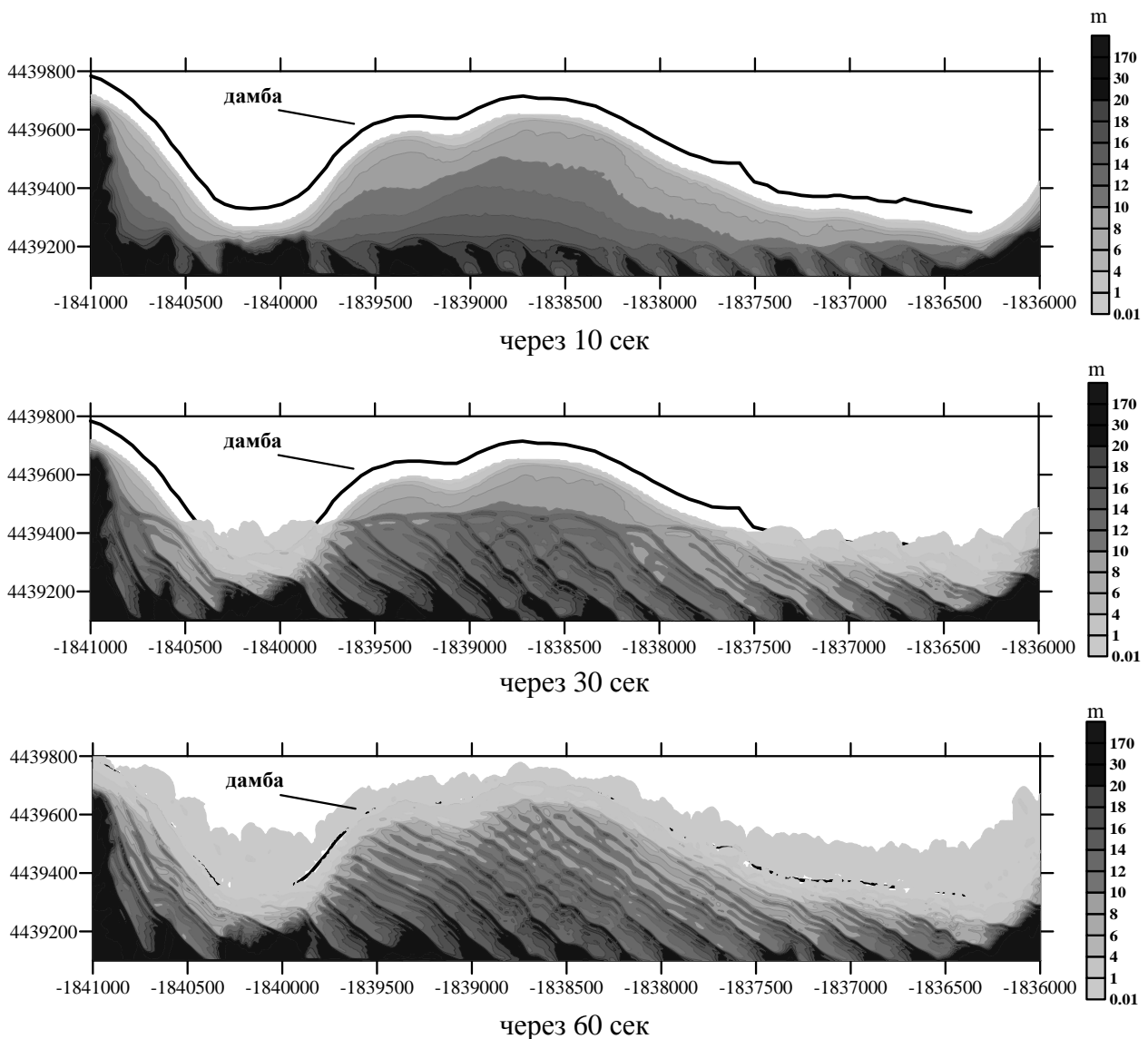


Рис. 1. Глубина воды в разные моменты времени наката волн на берег для шторма 01.1993 года

Математическое моделирование наката волн и берегового размыва Имеретинского побережья во время экстремальных штормов

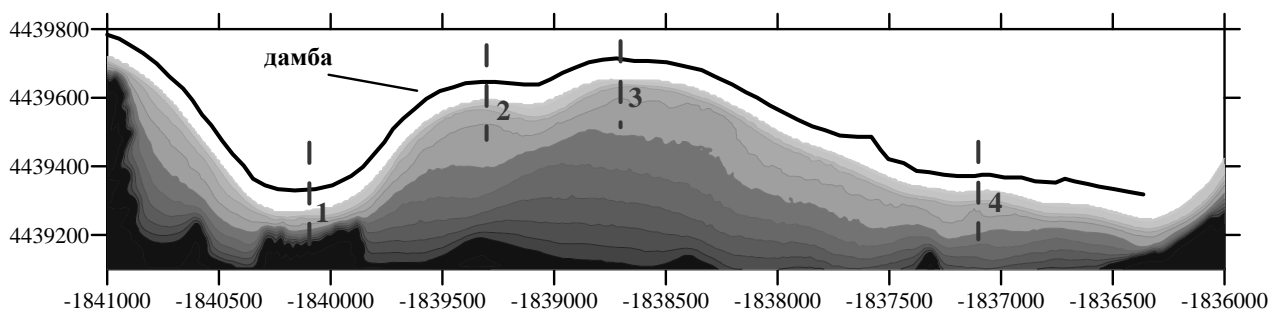


Рис. 2. Расположение профилей с соответствующими номерами

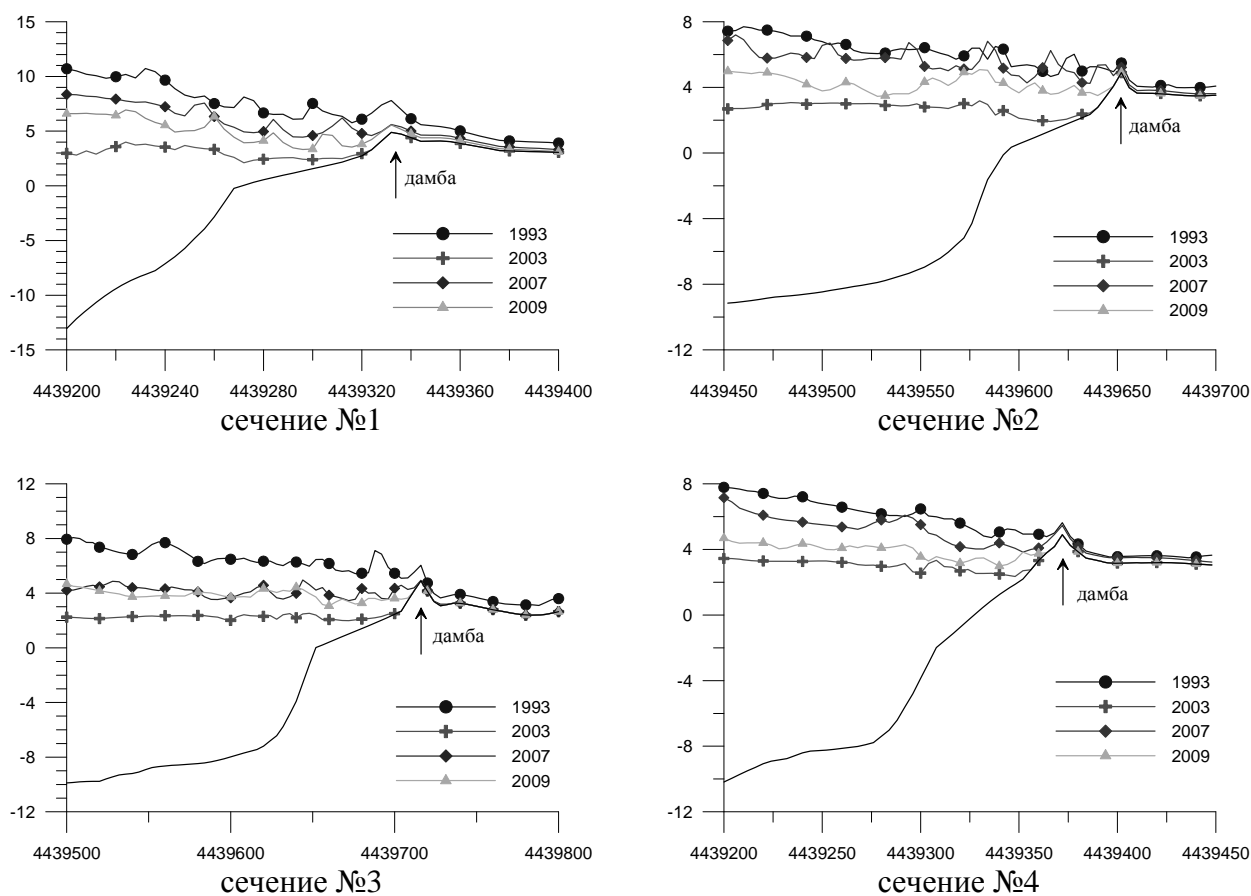


Рис. 3. Максимальные уровни поверхности воды за 200 секундный промежуток наката волн на берег для различных штормов.

В техническом отчете ООО Инжзащита (2008) представлены данные об обследовании зон наката на Имеретинском побережье после разрушительного шторма ноября 2007. На рис.4 показано сравнение про-

делированной зоны наката с наблюдаемой во время шторма ноября 2007 года, которое говорит о хорошем совпадении рассчитанной и наблюдаемой зон наката.

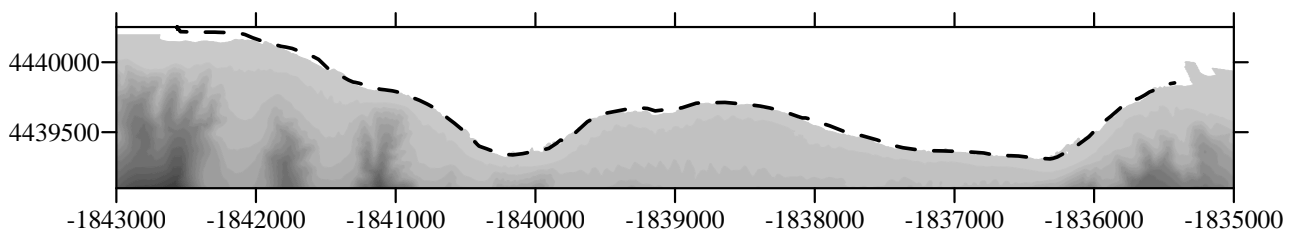


Рис. 4. Сравнение наблюдаемой зоны наката (пунктирная линия) во время ноябрьского шторма 2007 года с рассчитанной по модели COASTOX.

### 3. ПЕРЕФОРМИРОВАНИЕ ПЛЯЖЕЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ НАКАТА ШТОРМО-ВЫХ ВОЛН

В зоне наката волн переформирование пляжа рассчитывалось под штормовыми волнами, накатывающимися на берег. Транспортирующая способность рассчитывалась по уравнению Camenen-Larson. Средний диаметр влекомых наносов был равен 60 мм.

Моделировался размыв берега во время штормов различной силы. Для этого выбирались три сечения, положение которых приведено на рис.5. В качестве базовых штормов рассматривались шторм в январе 1993 г., шторм в ноябре 2007 г. и шторм в декабре 2009 г. Предполагалось, что шторм длится 10 часов. Считалось, что волны перпендикулярно подходят к берегу.

Результаты моделирования показаны на рис.11.

Важным результатом такого расчета является демонстрация того, что и при моделировании перемещения наносов индивидуально под каждой волной основные процессы переформирования дна проходят в зоне вблизи уреза, которая моделируется двумерной моделью. Расчет показывает наличие второй зоны активных переформирований в зоне заплеска через дамбу пляжа.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дикий П.В., Дзюба Н.Н., Железняк М.И., Сорокин М.В.** Моделирование волнового режима побережья имеретинской низменности (в данном номере журнала).
2. **Кивва С.Л., Железняк М.И.** Двумерное моделирование стока и транспорта наносов с малых водосборов //Прикладная Гидромеханика.- 2002.- 4(76). - вып..1.- С.67-89.
3. **Демченко Р.И., Железняк М.И., Кивва С.Л., Коломиец П.С.** Гидродинамика прибрежной зоны Черного моря в районе устья рукава Быстрый дельты р.Дунай: 1. Трансформация волн на неоднородностях дна и течениях Прикладная гидромеханика,8(80), №3 2006, 39-46.
4. **Железняк М.И., Коломиец П.С., Демченко Р.И., Кивва С.Л.** Двумерное моделирование вдольбереговой циркуляции, переноса наносов и размывов галечных пляжей Имеретинской низменности (в данном номере журнала).
5. MIKE 21 Coastal Hydraulics and Oceanography User Guide.Danish Hydraulic Institute: Hørsholm, Denmark. DHI. 2004.
6. **Militello, A., Reed, C. W., Zundel, A. K., and Kraus, N. C.** "Two-dimensional circulation model M2D: Version 2.0, Report 1, technical documentation and user's guide," Coastal Inlets Research Program Technical Report ERDC-CHL-TR-04-02, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS., 2004.
7. «Инжзащита» (2008) Отчет по теме: Заключение о характере прохождения экстремального шторма 10-12 ноября 2007 года и материалы обследования береговой зоны Черного моря на участке Имеретинской низменности после осеннего шторма 2007 года с оценкой абразивного размыва берега, границ и отметок наката», ООО «Инжзащита», Сочи, 2008- 68 стр.

Математическое моделирование наката волн и берегового размыва Имеретинского побережья во время экстремальных штормов

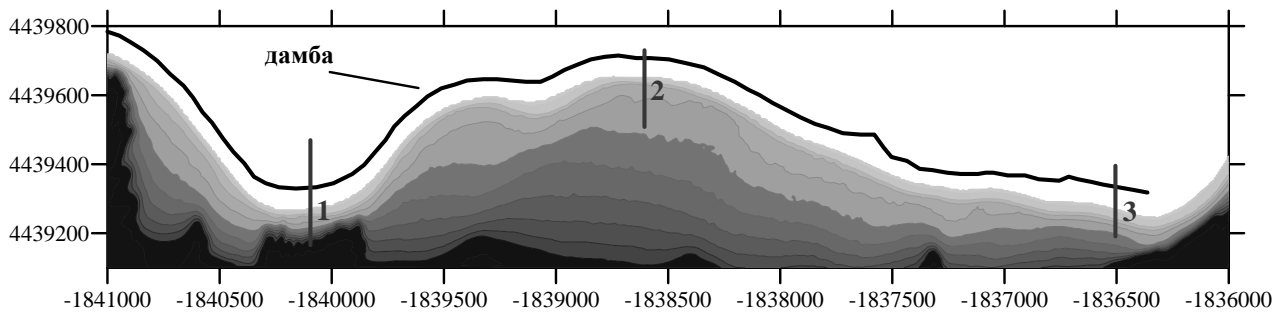


Рис. 5. Положение профилей с соответствующими номерами

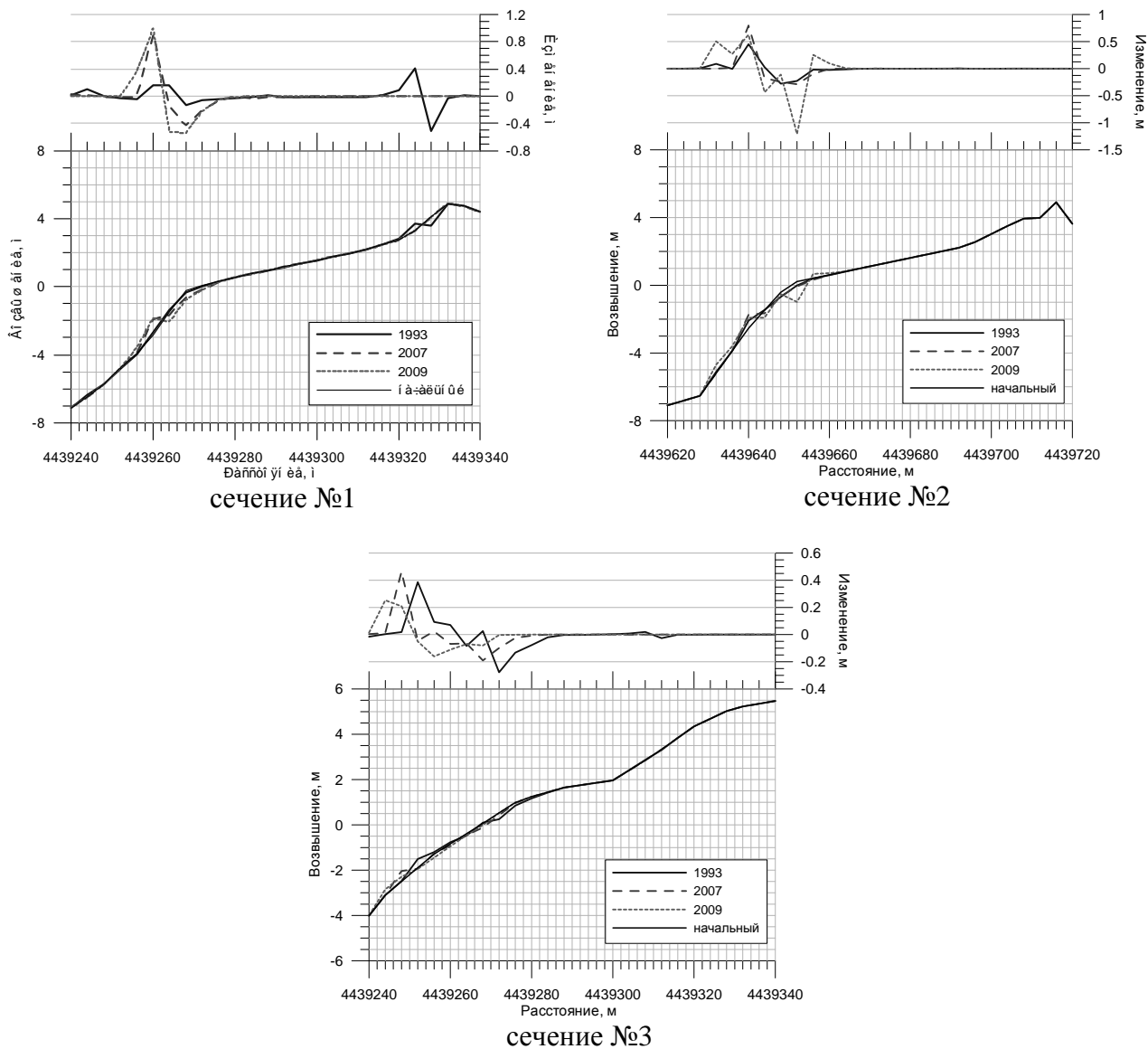


Рис.6. Изменение профиля берега во время штормов

8. Camenen, B., and M. Larson. 2005. A general formula for non-cohesive bed load sediment transport. *Estuarine, Coastal, and Shelf Science* 63(1-2):249-260.

---

Кивва Сергей Леонидович, Украинский центр экологических и водных проектов, 03187, Украина, Киев, пр. Глушкова, 42, e-mail: slk@env.kiev.ua.

Железняк Марк Иосифович, Украинский центр экологических и водных проектов Академии технологических наук Украины, 03187, Украина, Киев, пр. Глушкова, 42, e-mail: mark@env.com.ua.

Коломиец Павел Сергеевич, Украинский центр экологических и водных проектов Академии технологических наук Украины, 03187, Украина, Киев, пр. Глушкова, 42, e-mail: pavlo@env.kiev.ua.

Сорокин Максим Викторович, Украинский центр экологических и водных проектов Академии технологических наук Украины, 03187, Украина, Киев, пр. Глушкова, 42, e-mail: maxim.sorockin@gmail.com

Sergey L. Kivva, Ukrainian Center of Environmental and Water Projects, 42, pr.Glushkova, 03187, Kiev, UKRAINE, e-mail: slk@env.kiev.ua.

Mark I. Zheleznyak, Ukrainian Center of Environmental and Water Projects, 42, pr.Glushkova, 03187, Kiev, UKRAINE, e-mail: mark@env.com.ua.

Pavel S. Kolomiets, Ukrainian Center of Environmental and Water Projects, 42, pr.Glushkova, 03187, Kiev, UKRAINE, e-mail: pavlo@env.kiev.ua.

Maxim V. Sorokin, Ukrainian Center of Environmental and Water Projects, 42, pr.Glushkova, 03187, Kiev, UKRAINE, e-mail: maxim.sorockin@gmail.com

## ВЛИЯНИЕ ПОРТА НА ДИНАМИКУ ИМЕРЕТИНСКОГО БЕРЕГА

*И.О. Леонтьев*

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, РОССИЯ

**АННОТАЦИЯ:** Наличие порта создаст дополнительный дефицит наносов, и за восточным молом берег будет отступать со скоростью 5 м/год. У мыса Константиновский скорость рецессии составит 3-5 м/год, а восточнее мыса влияние порта ощущаться не будет.

**Ключевые слова:** берег, пляж, галька, вдольбереговой поток наносов, зоны дивергенции и конвергенции, дефицит наносов, смещение береговой линии, рецессия берега.

## INFLUENCE OF THE PORT ON THE DYNAMICS OF IMERETINKA COAST

*Igor O. Leont'yev*

P.P. Shirshov Institute of oceanology, Moscow, RUSSIA

**ABSTRACT:** Appearance of port will result in additional sediment deficit, and nearby the eastern jetty the coast recession will reach 5 m/y. At the cape Konstantinovskiy the recession rate will be about 3-5 m/y, while in the region to the east from cape no influence of port will exist.

**Key words:** coast, beach, pebble, alongshore sediment flux, divergence and convergence zones, sediment deficit, coast-line displacement, coast recession.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

На побережье Имеретинской низменности насыпается искусственный пляж и одновременно строится порт на участке, примыкающем к устью р. Мзымта (рис.1). Оградительные молы порта выходят на глубины более 10 м и, таким образом, целиком перекрывают вдольбереговые потоки гравия и гальки, которые концентрируются в приузловой полосе. По существу, полностью прекращается питание пляжей гравийно-галечным материалом, поступающим из устья р. Мзымты. Изъятие из бюджета такого важного источника наносов, очевидно, должно негативно отразиться на состоянии рассматриваемого побережья.

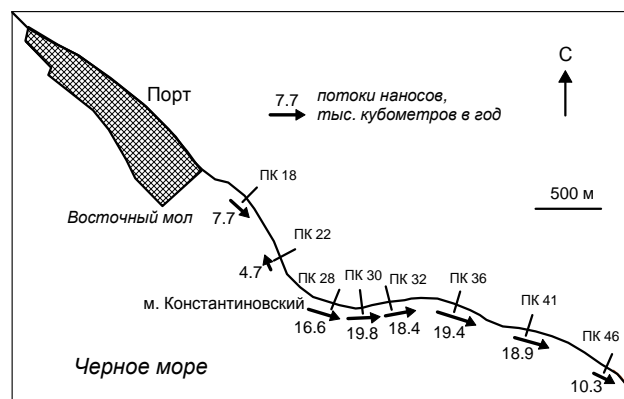


Рис.1. План имеретинского побережья и распределение вдольбереговых потоков наносов. Стрелки указывают направление потоков, а числа характеризуют их величину в тыс. м<sup>3</sup>/год. Показано также положение расчетных профилей с соответствующими номерами.

Для оценки последствий строительства порта необходимо, прежде всего, представлять величину потоков наносов, их направление и изменения вдоль побережья. Согласно имеющимся оценкам, поток направлен на юго-восток и составляет от 16 до 23 тыс. м<sup>3</sup>/год [1]. Эти значения получены для среднего размера твердых частиц 20 мм.

Однако после завершения строительства искусственного пляжа можно ожидать общее увеличение крупности наносов в береговой зоне, поскольку материал отсыпки будет иметь размер от 40 до 120 мм. Кроме того, есть сомнения в том, что однонаправленный поток сохраняется вдоль всего побережья. Так, западнее мыса Константиновского в районе ПК 22 (рис.1) береговая линия ориентирована таким образом, что доминирующие волнения ЮЗ румба должны провоцировать вдольбереговой перенос в северо-западном направлении. Следовательно, здесь вполне вероятно затухание юго-восточного потока. Косвенным свидетельством его разгрузки и аккумуляции материала служит подводный рельеф в районе ПК 22, который имеет характер отмели, ограниченной соседними более крутыми участками.

Вопрос о границах юго-восточного потока имеет принципиальное значение. Если он действительно исчезает перед м. Константиновским, то влияние порта едва ли будет сказываться на берегах, расположенных к востоку от мыса. Следовательно, имеет смысл заново провести расчеты потоков, основываясь на более реалистичном значении крупности частиц (скажем, 60 мм) и принимая во внимание изменения экспозиции берега.

## 2. МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Результирующий вдольбереговой поток наносов  $Q_{\Sigma}$  определяется как сумма элементарных потоков, проходящих через заданный створ,

$$Q_{\Sigma} = \sum_j \sum_i (Qt_w)_{ij}, \quad (1)$$

где индексы  $j$  и  $i$  относятся к данному направлению и данной градации высот волн, имеющей годовую продолжительность  $t_w$ .

Продольный расход  $Q$ , создаваемый отдельными волновыми ситуациями, подсчитывался по формуле Леонтьева [3], адаптированной к условиям гравийно-галечного материала (размер частиц  $1 \leq d_s \leq 100$  мм):

$$Q = 0.04\mu \left(1 - \frac{10d_s}{H_{rmsB}}\right) (EC_g)_B \sin \Theta_B \cos \Theta_B, \quad (2)$$

где  $H_{rms}$  - среднеквадратичная высота волн,  $EC_g$  - поток энергии,  $\Theta$  - угол между направлением волн и нормалью к берегу, индекс «B» относится к глубине обрушения волн  $h_B$ . Если  $Q$  измеряется в м<sup>3</sup>/ч, то  $\mu = 3600/[g(\rho_s - \rho)(1 - \sigma)]$ , где  $g$  - ускорение силы тяжести,  $\rho$  - плотность воды,  $\rho_s$  и  $\sigma$  - плотность и пористость осадков. Глубина обрушения  $h_B$  определяется из условия постоянства потока энергии  $(EC_g)_{\infty} \cos \Theta_{\infty} = (EC_g)_B \cos \Theta_B$ , где индексы « $\infty$ » относятся к глубокой воде,  $C_g$  - групповая скорость, причем  $C_{g\infty} = (1/4\pi)gT_p$ ,  $C_{gB} = \sqrt{gh_B}$ . В результате имеем

$$h_B = \left(\frac{1}{4\pi\gamma_B^2}\right)^{2/5} H_{rms\infty}^{4/5} (gT_p^2)^{1/5} \left(\frac{\cos \Theta_{\infty}}{\cos \Theta_B}\right)^{2/5},$$

$$\gamma_B = \frac{H_{rmsB}}{h_B}, \quad (3)$$

где,  $T_p$  - период пика спектра. Предполагается, что на глубине  $h_B$  начинается обрушение волн 1% обеспеченности, высота которых  $H_{1\%B}$  достигает отношения  $H_{1\%B}/h_B = 0.8$ . Тогда с учетом релеевского

распределения высот имеем  $H_{rmsB}/h_B = \gamma_B = 0.37$ . Угол подхода волн  $\Theta_B$  определяется из закона рефракции Снелла:  $\sin \Theta_B / C_B = \sin \Theta_\infty / C_\infty$ ,  $C_B = \sqrt{gh_B}$ ,

$$C_\infty = (g/2\pi)T_p. \quad (4)$$

Вначале глубина  $h_B$  вычисляется без учета изменений углов  $\Theta$ . Затем  $h_B$  корректируется с учетом полученного угла  $\Theta_B$ , после чего корректируется и  $\Theta_B$ .

Формула (2) протестирована по данным наблюдений на галечных пляжах Англии [5] и, по-видимому, работает и в условиях черноморского побережья. Так, по данным [4], в районе Пицунды во время шторма с высотой волн 3.5 м, периодом 9 с и углом подхода волн  $35^\circ$  расход гальки со средним размером 40 мм мог составлять примерно  $600 \text{ м}^3 \text{ ч}^{-1}$ . Расчет по формуле (2) дает около  $500 \text{ м}^3 \text{ ч}^{-1}$ . Изменения потока наносов вызывают эрозию или аккумуляцию, что приводит к смещению береговой линии. Расчет величины смещения поясняется схемой, показанной на рис. 2.

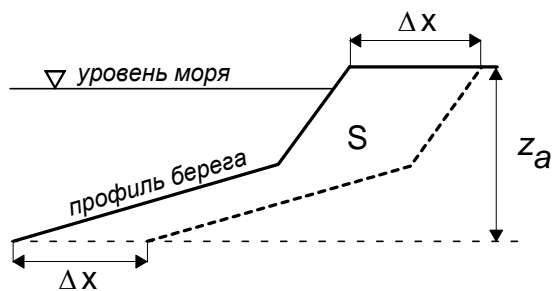


Рис.2. Схема к расчету смещений береговой линии.

Пусть активная часть берегового профиля высотой  $z_a$  отступает за год на расстояние  $\Delta x$ . Тогда площадь  $S$ , заключенная между начальным и конечным положениями профиля, эквивалентна годовому объему потерь материала на единицу длины берега. Эта площадь выражается произведением  $S = z_a \Delta x$ , откуда смещение берега определяется как

$$\Delta x = S / z_a \quad (5)$$

В рассматриваемых условиях величина  $z_a$  может составлять около 10 м.

### 3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Роза волнений в районе сочинского берега характеризуется преобладанием ЮЗ и З направлений. На основе данных о повторяемости волнений различных направлений и длительности действия разных градаций высот волн [1], была составлена таблица 1. Она отражает суммарную годовую продолжительность волнений различных направлений и силы.

Расчеты потоков наносов выполнялись на восьми расчетных створах, расположенных вдоль имеретинского берега (рис.1). При этом принимались следующие характеристики наносов: плотность  $\rho_s = 2.65 \times 10^3 \text{ кг м}^{-3}$ , пористость  $\sigma = 0.4$ , средний размер гальки  $d_s = 60 \text{ мм}$ .

### 4. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты расчетов вдольбереговых потоков наносов представлены в таблице 2. Здесь для каждого расчетного створа указаны годовые объемы перемещения наносов на СЗ и на ЮВ, а также результирующие потоки. Отрицательные значения соответствуют переносу материала на ЮВ. Распределение потоков наносов вдоль побережья отражено на рис.1. Как видно из полученных результатов, восточнее мыса Константиновского поток наносов направлен на юго-восток и сравнительно однороден, изменяясь от 16 до 20 тыс.  $\text{м}^3/\text{год}$ . Это почти совпадает с оценкой, приведенной в техническом отчете [1]. С приближением к устью р. Псоу поток уменьшается.

Таблица 1. Годовая продолжительность (в часах) характерных волнений, подходящих к берегу с различных направлений

H, м	T, с	ЗСЗ	З	ЗЮЗ	ЮЗ	ЮЮЗ	Ю	ЮЮВ	ЮВ
1.0	4.5	217	216	175	123	123	123	105	52
2.2	6.7	-	14	18	35	32	9	4	-
3.1	8.0	-	4	9	9	4	-	-	-

Таблица 2. Вдольбереговые потоки наносов на различных участках побережья (тыс. кубометров в год)

Поток	ПК18	ПК22	ПК28	ПК30	ПК32	ПК36	ПК41	ПК46
На ЮВ	-17.8	-12.1	-21.7	-22.0	-19.8	-24.1	-23.0	-19.3
На СЗ	10.1	16.8	5.1	2.2	1.4	4.7	4.1	9.0
Итого	-7.7	4.7	-16.6	-19.8	-18.4	-19.4	-18.9	-10.3

Что же касается западного района побережья, то потоки здесь разнонаправлены. У ПК 18 наносы в среднем перемещаются на юго-восток, а у ПК 22 они движутся в противоположном направлении, хотя и в сравнительно малых объемах. Таким образом, на участке берега между ПК 18 и 22 имеет место конвергенция потоков. Некоторая часть поступающего материала, вероятно, аккумулируется на дне, но основная доля уходит на глубину через соседние каньоны.

Главный вывод заключается в том, что юго-восточный поток прерывается перед м. Константиновским. Следовательно, зона влияния порта на перемещение наносов и динамику берегу должна ограничиваться только западным сектором имеретинского побережья.

Оценивая смещения береговой линии, отметим, что самое сильное воздействие порта будет ощущаться на участке в районе ПК 18. Потенциальный вдольбереговой поток наносов здесь составляет  $V \approx 8$  тыс. м<sup>3</sup>/год (таблица 2). Но поскольку приток материала от устья р. Мзымты перекрыт, то источником наносов может служить только берег. Длина рассматриваемого участка близка к  $l \approx 400$  м. Соответственно потери на единицу длины берега составляют  $S = V/l \approx 20$  м<sup>3</sup>м<sup>-1</sup>год<sup>-1</sup>. Таким образом, скорость отступления бере-

говой линии, согласно (2), должна составить 2 м/год. К полученной величине следует добавить годовое смещение берега за счет выноса материала в каньон Новый в объеме 12.5 тыс. м<sup>3</sup>/год [2]. В результате будем иметь суммарное значение  $S \approx 51$  м<sup>3</sup>м<sup>-1</sup>год<sup>-1</sup> и, таким образом, полная скорость отступления берега в районе ПК 18 может достигать 5 м/год.

В районе мыса Константиновский влияние порта уже не ощущается. Однако берег здесь подвержен размыву в силу естественных причин, а именно, вследствие дивергенции вдольберегового потока (рис.1). Участок между ПК 22 и 28 длиной около  $l \approx 600$  м должен терять ежегодно более 20 тыс. м<sup>3</sup> наносов (таблица 2). На единицу длины берега это составляет  $S \approx 30$  м<sup>3</sup>м<sup>-1</sup>год<sup>-1</sup>, и скорость рецессии, согласно (2), может достигать 3 м/год.

Еще один неблагоприятный участок располагается в районе ПК 28 напротив каньона Константиновский. Уход материала в каньон оценивается величиной 17.5 тыс. м<sup>3</sup>/год [2]. При длине участка  $l \approx 400$  м имеем  $S \approx 40$  м<sup>3</sup>м<sup>-1</sup>год<sup>-1</sup>, что обуславливает рецессию около 4 м/год.

Часть побережья, расположенная восточнее каньона Константиновский, по-видимому, не

испытывает заметного дефицита наносов и находится в сравнительно устойчивом состоянии.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования можно суммировать следующим образом.

Поток наносов восточнее мыса Константиновского направлен на юго-восток и составляет от 16 до 20 тыс. м<sup>3</sup>/год. К западу от мыса поток неоднороден. На участке между ПК 18 и ПК 22 отмечается конвергенция, а между ПК 22 и ПК 28 – дивергенция потоков.

Порт полностью блокирует поступление наносов из устья р. Мзымты, и в районе ПК 18 создается дополнительный дефицит материала около 8 тыс. м<sup>3</sup>/год. С учетом стока в каньон Новый общий дефицит превысит 20 тыс. м<sup>3</sup>/год. В результате берег на участке 400-метровой длины будет отступать со скоростью 5 м/год.

Дефицит материала (35-40 тыс. м<sup>3</sup>/год) должен ощущаться и в зоне между ПК 22 и ПК 30 вследствие дивергенции потока и ухода материала в каньон Константиновский. Берег здесь будет отступать со скоростью 3-4 м/год.

Для сохранения пляжей на обозначенных проблемных участках потребуются подсыпка галечного материала в объеме дефицита. На 400-метровом участке в районе ПК 18 следует подсыпать около 50 м<sup>3</sup>м<sup>-1</sup>год<sup>-1</sup>, а на втором участке длиной около 1 километра – 30-40 м<sup>3</sup>м<sup>-1</sup>год<sup>-1</sup>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инженерная защита территории Имеретинской низменности (включая проектно-изыскательские работы). 2 этап. Берегоукрепление. Том 3. Книга 2. Математическое моделирование берегозащитных мероприятий на побережье Имеретинской низменности. Технический отчет. Москва, 2009.
2. Инженерные изыскания для обоснований и корректировки проектных решений по берегоукреплению Имеретинской низменности. Гидрометеорологические изыскания. ОАО ЦНИИС. Технический отчет. Москва, 2010.
3. **Леонтьев И.О.** Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001, 272 с.
4. **Пешков В.М.** Галечные пляжи неприливных морей. Основные проблемы теории и практики. Краснодар, 2005, 444 с.
5. **Van Wellen E., Chadwick A.J., Mason T.** A review and assessment of longshore sediment transport equations for coarse-grained beaches // Coastal Eng. 40, 2000, 243-275.

---

Леонтьев Игорь Олегович, главный научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН. Москва, 117997, Нахимовский проспект, 36. e-mail: igor.leontiev@gmail.com

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ШТОРМОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРОФИЛЯ ГАЛЕЧНОГО ПЛЯЖА

*Леонтьев И.О.*

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, РОССИЯ

**АННОТАЦИЯ:** Моделирование воздействий штормовых волн на искусственный галечный пляж, сооружаемый на имеретинском побережье, приводит к выводу об устойчивости пляжа за исключением нескольких участков, примыкающих к подводным каньонам.

**Ключевые слова:** моделирование, шторм, берег, пляж, галька, подводный склон, деформации профиля дна, размыв, аккумуляция

## MODELING THE STORM-INDUCED DEFORMATIONS OF A PEBBLE BEACH PROFILE

*Igor O. Leont'yev*

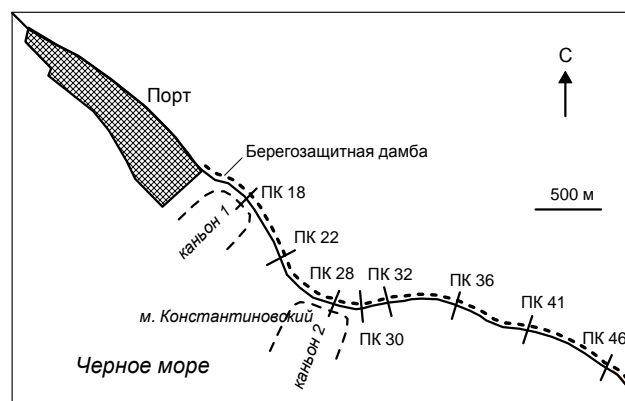
P.P. Shirshov Institute of oceanology, Moscow, RUSSIA

**ABSTRACT:** Modeling the impact of stormy waves on the artificial pebble beach built up on the Imeretinka coast, leads to conclusion that the beach will be stable, excepting some coast segments neighboring submarine canyons.

**Key words:** modeling, storm, coast, beach, pebble, underwater slope, bed profile deformations, erosion, accretion

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время пляжи имеретинского побережья, расположенного к востоку от устья р. Мзымты, испытывают недостаток питания. Особенно опасное положение создается в районах каньонов Новый и Константиновский (каньоны 1 и 2 на рис.1), которые поглощают наносы и все глубже врезаются в берег. Существующую ситуацию в какой-то мере можно исправить путем добавления определенного количества пляжеобразующего материала в литодинамическую систему. Именно такой способ укрепления берега предполагается реализовать в результате сооружения берегозащитной дамбы (рис.1). В ее верхней части укладываются бетонные блоки, а ниже отметки 2.5 м отсыпается галечный пляж шириной 50 м.



*Рис.1. План исследуемого побережья. Штрихами, перпендикулярными берегу, обозначено положение расчетных профилей с соответствующими номерами.*

В связи со строительством объекта возникает ряд вопросов, касающихся реакции пляжа на волновые воздействия, его устойчивости

и способности обеспечить эффективную защиту побережья от экстремальных штормов. Задача данной работы заключается в том, чтобы попытаться ответить на эти вопросы. Решение основывается на математическом моделировании береговых процессов. Существующие модели разработаны, главным образом, для песчаных наносов. Поэтому требуется определенная адаптация их к условиям галечного материала.

## 2. МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Штормовые деформации профиля берега определяются на основе закона сохранения массы

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \mu \frac{\partial q}{\partial x}, \quad \mu = [g(\rho_s - \rho)(1 - \sigma)]^{-1}, \quad (1)$$

где  $h$  – глубина,  $t$  – время,  $q$  – расход наносов (в единицах погруженного веса наносов в секунду на метр ширины потока), ось  $Ox$  направлена по нормали к берегу,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\rho$  – плотность воды,  $\rho_s$  и  $\sigma$  – плотность и пористость осадков.

Расход наносов определяется на основе формулы Бэгнольда [7], причем в условиях гравия и гальки во внимание принимаются только влекаемые наносы,

$$q = \frac{\varepsilon_b}{\tan \Phi} \tau u, \quad \tau = \frac{1}{2} f \rho |u| u, \quad (2)$$

где  $\Phi$  – угол естественного откоса грунта,  $\varepsilon_b$  – коэффициент эффективности,  $\tau$  – донное касательное напряжение,  $f$  – коэффициент трения,  $u$  – скорость течения. В случае осциллирующего волнового потока (2) приобретает вид формулы Бэйларда [8],

$$\bar{q} = \frac{1}{2} f_w \rho \frac{\varepsilon_b}{\tan \Phi} \overline{|u|^2}, \quad (3)$$

где  $f_w$  – коэффициент трения для волн,  $u$  – мгновенная орбитальная скорость, горизонтальная черта означает осреднение за период волн.

**В зонах трансформации и прибойя** величина  $u$  представляется суммой двух гармоник (с амплитудами  $u_m$  и  $u_{2m}$  и частотами  $\omega$  и  $2\omega$ ) и скорости переноса  $\bar{u}$ :

$$u = u_m \cos \omega t + u_{2m} \cos 2\omega t + \bar{u}, \quad u_{2m} \ll u_m, \quad \bar{u} \ll u_m. \quad (4)$$

Тогда  $\overline{|u|^2} = \frac{3}{4} u_m^2 u_{2m} + \frac{3}{2} u_m^2 \bar{u}$ , и формула (3) переходит в

$$\bar{q} = \frac{9\pi}{16} \frac{\varepsilon_b}{\tan \Phi} D_f \left( \frac{u_{2m}}{u_m} + 2 \frac{\bar{u}}{u_m} \right) \cos \Theta, \quad D_f = \frac{2}{3\pi} f_w \rho u_m^3, \quad (5)$$

где  $D_f$  – скорость диссипации энергии за счет донного трения,  $\Theta$  – угол между лучом волны и нормалью к берегу, отношение  $u_{2m}/u_m$  выражает отношение амплитуд гармоник, т.е. асимметрию волн.

Согласно Ван Веллену и др. [9], крупность гравийно-галечного материала в формулах транспорта может быть учтена введением зависимости вида  $(1 - c_d d_s / H)$ , где  $d_s$  – средний размер частиц,  $H$  – характерная высота волн,  $c_d$  коэффициент порядка 10.

Кроме того, в формулу транспорта включается локальный уклон дна  $s = -\partial h / \partial x$  посредством добавки члена  $-2s|\bar{q}|$  [2]. В результате формула расхода приобретает окончательный вид

$$q = \bar{q} - 2s|\bar{q}|, \quad \bar{q} = \frac{9\pi}{16} \frac{\varepsilon_b}{\tan \Phi} \left( 1 - 10 \frac{d_s}{H_\infty} \right) D_f \left( \frac{u_{2m}}{u_m} + 2 \frac{\bar{u}}{u_m} \right) \cos \Theta, \quad (6)$$

где  $H_\infty$  - средняя высота волн на глубокой воде.

Условие начала движения гравийно-галечных наносов, как и в случае песка, может быть определено значением параметра Шилдса:

$$\Psi_{2.5} \geq 0.05, \Psi_{2.5} = \frac{f_{w2.5} \rho u_m^2}{2(\rho_s - \rho) g d_s^2}, \quad (7)$$

где значение  $f_{w2.5}$  основано на условной шероховатости  $r_{2.5} = 2.5d_s$ . Величины  $f_w$ ,  $u_m$ ,  $u_{2m}/u_m$  и  $\bar{u}$  определены в [2, 3].

**В зоне заплеска (наката)** максимальный расход  $\hat{q}_{Rx}$  представляется в форме [2]

$$\hat{q}_{Rx} = K_R \rho u_R^3 (\beta_{eq} - \beta). \quad (8)$$

Здесь  $u_R = \sqrt{2gR}$  - масштаб скорости заплеска,  $R$  - его высота, коэффициент  $K_R$  зависит как от параметров волн, так и от размера наносов,  $\beta$  и  $\beta_{eq}$  - фактический и равновесный уклоны пляжа. Если фактический уклон больше равновесного, то расход наносов отрицательный (направлен от берега в море).

Зависимости для величин  $R$ ,  $K_R$  и  $\beta_{eq}$  определены в [2]. На основании проведенных тестов можно заключить, что эти зависимости применимы как для песка, так и для гравийно-галечного материала.

### 3. ИСХДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Берега в Имеретинской низменности в целом приглубые. Поэтому штормовые волны лишь в малой степени теряют свою энергию при подходе к берегу, что определяет высокую интенсивность лито- и морфодинамических процессов. Ветровой нагон в силу приглубости берега незначителен.

Наибольшей силы достигают волнения ЮЗ румба. Представление о средней высоте  $H$  и среднем периоде волн  $T$  при экстремальных юго-западных штормах с различным перио-

дом повторяемости дает таблица 1, построенная на основе данных Союзморниипроекта [5]. Здесь, кроме того, указаны принятые при моделировании высота ветрового нагона  $\eta$  и продолжительность действия шторма  $t_w$ . Последняя величина условна и отражает характерную длительность фазы стабилизации шторма.

Моделирование штормовых деформаций дна выполнялось на восьми расчетных профилях, расположенных в различных точках имеретинского берега (рис.1). При этом учитывался угол экспозиции профилей по отношению к ЮЗ штормам. Вид некоторых профилей показан на рис.2 (в нижней части). Там же обозначены контуры планируемых отсыпок материала. Начало всех профилей располагается на глубине 10 м.

Таблица 1. Параметры экстремальных ЮЗ штормов, использованные при моделировании деформаций профилей берега

$n$ , лет	$H$ , м	$T$ , с	$\eta$ , м	$t_w$ , ч
1	3.0	8.0	0.00	36
5	3.8	8.8	0.05	30
10	4.0	9.0	0.10	24
25	4.4	9.4	0.15	18
50	4.8	9.7	0.20	12

При расчетах принимались следующие характеристики наносов: уклон естественного откоса  $\tan \Phi = 0.6$ , плотность  $\rho_s = 2.65 \times 10^3$  кг м<sup>-3</sup>, пористость  $\sigma = 0.4$ .

Размер гальки в материале отсыпки варьируется в пределах от 40 до 120 мм. Поведение разнородного материала, тем более гальки, вообще говоря, не поддается описанию существующими методами. Поэтому моделирование было проведено для двух характерных типов наносов, а именно, средней и крупной гальки размером 40 и 80 мм. Это позволяет в какой-то мере учесть влияние размера частиц на морфодинамические процессы.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В процессе штормового воздействия профиль берега стремится принять равновесную форму, которая, согласно уравнению (1), отвечает условию минимальных градиентов расходов наносов. Деформации дна как раз и отражают процесс формирования профиля равновесия. Чем ближе начальный профиль к равновесному, тем меньшие изменения он испытывает.

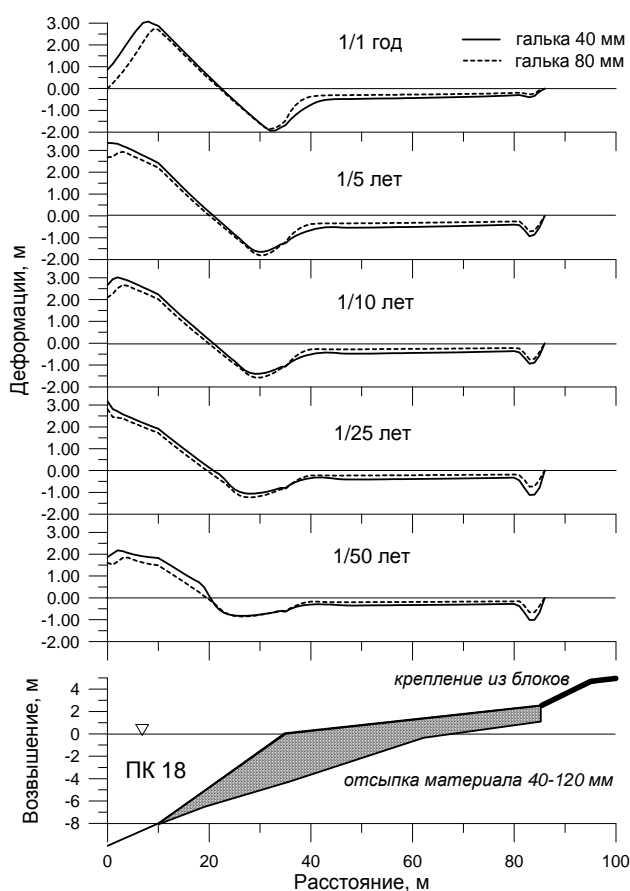


Рис.2а. Штормовые деформации профиля ПК 18.

Амплитуда деформаций определяется разностью начальной и конечной глубин в данной точке. Положительные деформации соответствуют аккумуляции, а отрицательные – размыву.

Распределения штормовых деформаций на некоторых профилях при действии ЮЗ штормов различной повторяемости показаны

на рис.2а, б, в. Общей чертой полученных распределений является то, что во всех случаях отмечается углубление дна вблизи уреза, перемещение материала вниз по склону и аккумуляция его в нижней части профиля. Эти тенденции вполне согласуются с данными наблюдений за штормовыми изменениями галечных пляжей [4].

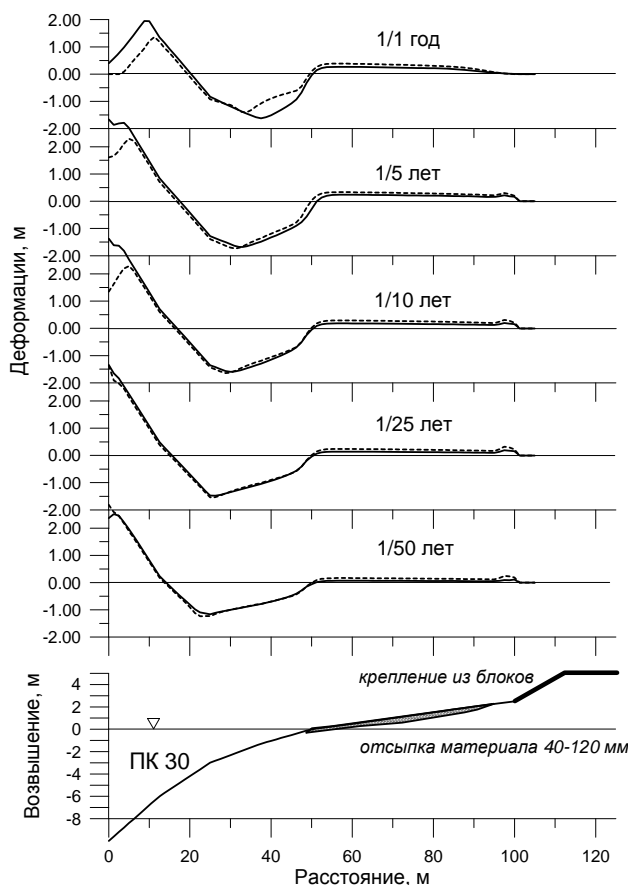


Рис.2б. Штормовые деформации профиля ПК 30.

Что касается надводной части пляжа, то тенденции здесь оказываются различными в зависимости от характера профиля и силы шторма. Так, профили ПК 18, 22, 28 и 36 демонстрируют размыв пляжа при всех штормовых ситуациях (рис.2а). Кроме того, у края крепления из блоков формируется яма размыва. Ее глубина на профиле ПК 18 превышает 1 м, на профиле ПК 28 – 0.7 м, что измеримо с толщиной слоя отсыпки. В дру-

гих случаях размыв не превышает первых десятков сантиметров.

На профиле ПК 30 (рис.2б) наносы накапливаются на пляже во всех рассмотренных ситуациях, причем самая заметная аккумуляция связана с относительно более слабыми штормами. Для данного профиля запланирован минимальный объем отсыпки, и в свете полученных результатов это выглядит вполне приемлемым решением.

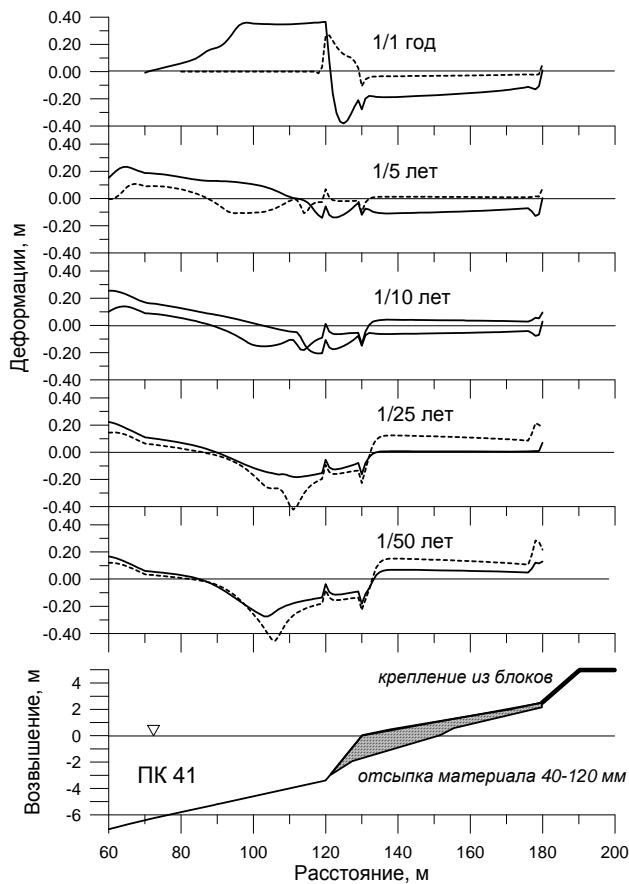


Рис.2в. Штормовые деформации профиля ПК 41.

Профили ПК 32, 41 и 46 демонстрируют смену тенденций при изменении силы волнения. Размыв пляжа при относительно более слабых волнениях сменяется его нарастанием при более сильных воздействиях (рис.2в).

Как видно на рис. 2, наиболее значительные деформации не обязательно связаны с самыми сильными штормами. При больших размерах волн градиенты расходов наносов мо-

гут быть меньше, чем при сравнительно более коротких волнах. Однако воздействию подвергается более протяженная область берегового склона, и главные черты профиля формируются именно экстремальными штормами.

Масштаб деформаций значительно изменяется от профиля к профилю. Из анализа полученных результатов следует, что одним из факторов, контролирующих этот масштаб, служит уклон берегового склона.

В таблице 2 максимальные величины деформаций подводного склона и пляжа, поставлены в соответствие со средним уклоном профиля, который определялся по расстоянию от берега до 10-метровой изобаты. Аккумуляция на пляже не обнаруживает какой-либо связи с уклоном. Однако в отношении размывов пляжа и подводного склона такая связь прослеживается достаточно четко. Это хорошо видно на рис.3, который представляет полученные результаты в графическом виде. Очевидна тенденция к росту величин размыва при увеличении уклона профиля.

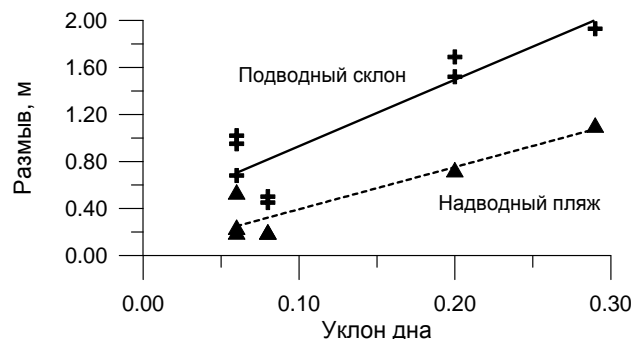


Рис.3. Максимальный размыв дна как функция среднего уклона профиля.

В свете полученных результатов самыми уязвимыми являются участки берега в районах ПК 18 и ПК 28, где береговые склоны обрываются в каньоны. При штормовых воздействиях наносы смываются с пляжа, перемещаются вниз и безвозвратно теряются.

Таблица 2. Максимальные деформации подводного склона и пляжа при ЮЗ штормах различной повторяемости (период повторяемости указан в скобках). Средний уклон дна относится к участку подводного склона от берега до глубины 10 м

Профиль	Средний уклон дна	Размыв подводного склона, м	Размыв пляжа, м	Аккумуляция на пляже, м
ПК 18	0.30	1.93 (1)	1.11 (25)	-
ПК 22	0.06	0.68 (1)	0.24 (5)	0.09 (50)
ПК 28	0.20	1.52 (5)	0.73 (50)	-
ПК 30	0.20	1.69 (1)	-	0.39 (1)
ПК 32	0.08	0.45 (50)	0.20 (1)	0.24 (50)
ПК 36	0.06	0.95 (1)	0.54 (50)	-
ПК 41	0.08	0.45 (50)	0.20 (1)	0.28 (50)
ПК 46	0.06	1.02 (1)	0.20 (1)	0.24 (50)

На остальных участках условия в целом более благоприятны и не вызывают опасений. На профилях ПК 22, 32 и 41 штормовые размывы в целом не превышают 0.4 м. На профиле ПК 30 подводный склон может размываться на значительную глубину, но пляж при этом, как уже отмечалось, нарастает.

В отношении влияния размера частиц на характер деформаций можно констатировать, что распределения деформаций для крупности 40 и 80 мм в целом однотипны, а их амплитуды при увеличении размера частиц несколько уменьшаются. Правда, на профилях ПК 32 и 41 в случае более крупной гальки деформации возрастают, но остаются в целом достаточно малыми. Для получения репрезентативных оценок деформаций в условиях рассматриваемого берега, по-видимому, достаточно использовать среднее значение крупности материала  $d_s = 60$  мм.

Рассмотренные выше результаты отражают изменения берега при постоянных параметрах воздействия, т.е. в фазу стабилизации шторма. Однако реальные шторма включают также фазы развития и затухания. Поэтому представляет интерес промоделировать полный штормовой цикл с учетом изменений параметров во времени.

За основу был взят шторм, отмечавшийся в период 10-13 ноября 2007 г., сведения о котором известны из наблюдений [6]. Несмот-

ря на некоторые пробелы, с помощью ряда аналогий и предположений был построен схематический сценарий шторма, отраженный на рис.4. Здесь показаны изменения средних высот  $H$  и периодов волн  $T$ , а также возможной высоты ветрового нагона  $\eta$ . Как видно, высоты волн менялись в диапазоне от 1 до 4 м, периоды – от 6 до 9 с, уровень от 0 до 0.2 м. Общая продолжительность цикла составляла 96 ч. Допускалось, что направление волнения в течение всего цикла не изменялось, оставаясь юго-западным.

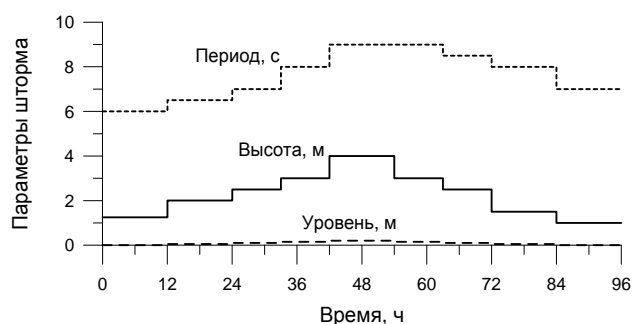


Рис.4. Изменения средних параметров волн и уровня в ходе штормового цикла 10-13.11.2007.

Расчеты проводились для гальки со средним размером 60 мм. Фазы шторма моделировались последовательно. Исходным профилем каждый раз служил профиль, полученный в конце предыдущей фазы. Конечные профили, сформированные по окончании цикла, показаны на рис.5 вместе с начальными профилями.

Как видно, наибольшие изменения претерпевает подводная часть берегового склона. Здесь формируется вогнутый профиль, который, в соответствии с теорией, обеспечивает наиболее равномерную диссипацию энергии и минимальные градиенты расходов наносов [2]. При этом смытый материал отлагается в основном в нижней части склона, но небольшая его часть может поступать и на пляж. Изменения оказываются минимальными в тех случаях, когда геометрия исходного профиля в наибольшей мере отвечает параметрам равновесной вогнутой кривой. Примерами тому могут служить профили ПК 32 и 41, где прохождение штормового цикла не оставило заметных следов.

На профиле ПК 30, несмотря на деформации подводного склона, положение уреза не изменилось. В остальных случаях берег отступил в сторону суши на несколько метров. На самом «неблагополучном» профиле ПК 18 смещение уреза составляет около 7 м. Это значение коррелируется с величинами смещений 6-10 м, зафиксированными после сильного шторма 14-16 ноября 1992 г. [1].

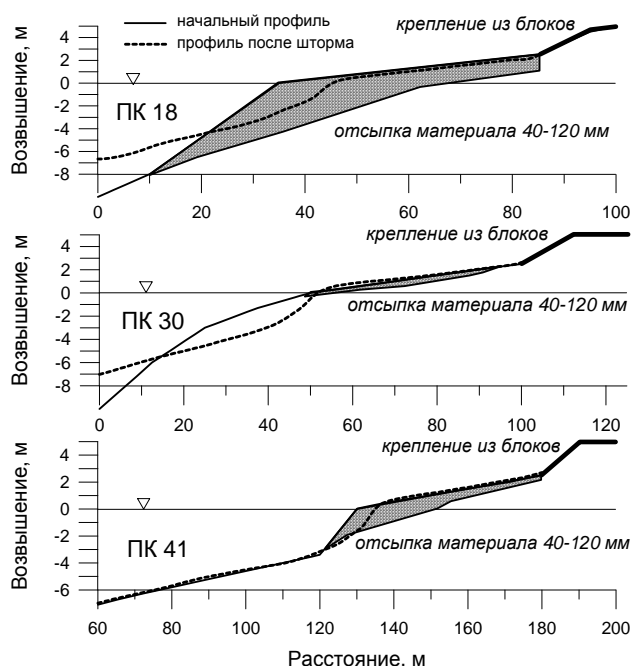


Рис.5. Сравнение начальных профилей с профилями, сформированными по окончании штормового цикла

В качестве положительного момента можно отметить, что надводная часть пляжа в основном сохраняет начальное положение. Таким образом, результаты моделирования дают основания полагать, что галечный пляж окажется достаточно устойчивым. Самым проблемным, как и прежде, оказывается участок ПК 18.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования сводятся к следующему.

В начальный период после строительства искусственного пляжа воздействие штормов будет сопровождаться оттоком некоторого количества материала из приурезовой полосы в нижнюю часть подводного склона, выработкой вогнутого профиля равновесия, и небольшим смещением уреза в сторону берега (на несколько метров). В дальнейшем положение уреза стабилизируется, и пляж будет в целом сохранять устойчивость. Исключение составят отдельные проблемные участки.

Амплитуды штормовых размывов подводного склона и пляжа увеличиваются с ростом среднего уклона исходного профиля. Самыми уязвимыми в этом отношении являются сегменты берега в районах ПК 18 и ПК 28. У нижнего края блоков, уложенных на откосе берегозащитной дамбы, здесь возможно появление ям размыва глубиной более 1 м. При каждом шторме материал пляжа будет безвозвратно уходить на глубину.

Для поддержания пляжей на обозначенных участках потребуется регулярная подсыпка галечного материала в объеме дефицита, определяемого по результатам мониторинга.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инженерная защита территории Имеретинской низменности (включая проектно-исследовательские работы). 2 этап. Берегоукрепление. Том 3. Книга 2. Матема-

- тическое моделирование берегозащитных мероприятий на побережье Имеретинской низменности. Технический отчет. Москва, 2009.
2. **Леонтьев И.О.** Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001, 272 с.
  1. **Леонтьев И.О.** Динамика профиля песчаного берега на различных масштабах времени // Сборник научных трудов «Фундаментальная и прикладная гидрофизика». № 4 (10), 2010, с. 78-89.
  2. **Пешков В.М.** Галечные пляжи неприливных морей. Основные проблемы теории и практики. Краснодар, 2005, 444 с.
  3. Порт Сочи. Строительство объектов федеральной собственности 2-го грузового района. Математическое моделирование элементов гидрологического режима. Союзморниипроект. Технический отчет. Москва, 2008.
  4. Технический отчет по теме: «Заключение о характере происхождения экстремального шторма 10-12 ноября 2007 г.». ООО Инжзащита. Сочи, 2008.
  5. **Bagnold R.A.** Mechanics of marine sedimentation // The Sea. V. 3. N. Y.: J. Wiley, 1963, pp. 507-528.
  6. Bailard J.A. An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach // J. of Geophys. Res. 86 (C 11), 1981, 10938-10954.
  7. **Van Wellen E., Chadwick A.J., Mason T.** A review and assessment of longshore sediment transport equations for coarse-grained beaches // Coastal Eng. 40, 2000, 243-275.

---

Леонтьев Игорь Олегович, главный научный сотрудник, Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН. Москва, 117997, Нахимовский проспект, 36. e-mail: igor.leontiev@gmail.com

## ЗАЩИТА БЕРЕГОВ И ОТКОСОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

*С.И. Рогачко<sup>1</sup>, Н.В. Шунько<sup>2</sup>*

Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса, УКРАИНА  
ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», г. Москва, РОССИЯ

**АННОТАЦИЯ:** На основании анализа силового воздействия ветровых волн на берегозащитные сооружения пассивного типа и особенностей их последующего разрушения, был разработан новый тип конструкции, представленный в данной статье.

**Ключевые слова:** гидротехническое сооружение, берегозащитное сооружение, сооружение пассивного типа, откос, камера гашения, длина волны, моделирование

## PROTECTION OF COAST AND SLOPES OF HYDRAULIC ENGINEERING CONSTRUCTIONS

*Stanislav I. Rogachko<sup>1</sup>, Natalia V. Shunko<sup>2</sup>*

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa, UKRAINE  
Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, RUSSIA

**ABSTRACT:** Based on the analysis of force of wind waves on the bank protection structure of a passive type and characteristics of their further destruction, a new type of design, presented in this paper.

**Key words:** hydraulic engineering constructions, coast protection construction, construction of a passive type, slope, clearing chamber, wave length, modelling.

Берега озер, водохранилищ, морей, а также откосы земляных плотин и искусственных островов в условиях открытого моря постоянно подвергаются силовому воздействию ветровых волн. Интенсивность разрушения берегов зависит от многих факторов и, в некоторых местах, может достигать нескольких метров в год. Разрушение откосов гидротехнических сооружений различных типов и функционального назначения могут стать причиной их предаварийного и аварийного состояния. В зависимости от значимости берегов и класса капитальности гидротехнических сооружений откосного типа, в процессе проектирования на разных стадиях, решаются вопросы их защиты различными способами, которые в настоящее время применяются в мировой инженерной практике. Это, в первую очередь, относится к торговым и спе-

циализированным портам, берегам приморских городов, энергетическим объектам, морским нефтегазопромысловым гидротехническим сооружениям, возводимых в условиях относительного мелководья. Исключением также не являются побережья южных морей с оздоровительными учреждениями, своими инфраструктурами и инженерными коммуникациями.

Мировой Океан постоянно наступает на сушу, поэтому проблема защиты морских берегов от разрушительного действия штормов приобретает глобальный характер. Гидротехническая наука за период своего существования разработала целый ряд конструктивных решений и технологий по защите берегов от воздействия ветровых волн. Параметры волн зависят от ряда факторов, таких как: продолжительность шторма; длина раз-

гона; топография дна; глубина воды перед гидротехническими объектами.

Возведением берегозащитных и откосных сооружений на реках, озерах, искусственных водохранилищах и морях люди занимаются с давних времен. За этот период времени в различных странах мира произошло множество аварий таких сооружений, сопровождавшихся иногда и многочисленными человеческими жертвами. Всесторонний анализ причин этих аварий позволил совершенствовать конструкции берегозащитных и откосных сооружений. Это привело к становлению науки о защите речных и морских побережий, которая в настоящее время выделилась в самостоятельную отрасль. Защита откосов подходов и судоходных каналов от воздействия судовых волн также относится к этой отрасли.

Сооружения пассивного типа возводятся в урезе воды или за его пределами при защите территорий за пляжем. Они воспринимают непосредственно на себя силовое воздействие волн и не допускают их проникновения на защищаемые территории, на которых располагаются промышленные или гражданские объекты. К сооружениям пассивного типа относятся разнообразные конструкции волнозащитных стенок (с вертикальным или криволинейным очертанием морской грани), сооружения откосного типа, сформированные различного рода набросками (каменными, фигурными искусственными блоками) или в виде непроницаемых откосов различной крутизны. При проектировании подобных берегозащитных сооружений, представляется необходимым, проведение экспериментальных исследований в лабораторных условиях с построением исследуемой модели в заданном масштабе и обеспечением полного соответствия параметров эксплуатации, с целью изучения эффективности работы того или иного конструктивного решения с учетом расчетных параметров волн в системе расчетного шторма и характера рельефа побережья. В ОНИЛ МНГС МГСУ, исследования такого рода, проводятся в рамках дого-

воров в соответствии с основным научным направлением лаборатории.

Следует отметить, что одним из существенных недостатков рассмотренных выше сооружений, является их относительная недолговечность. Данное обстоятельство подтверждалось неоднократно и в ходе проведения модельных опытов в лаборатории. Так, в процессе наката волн на берегозащитное сооружение, которое пересекает свободную поверхность воды, происходит уплотнение грунтового основания. Это приводит к нежелательным осадкам по его длине и к образованию соответствующих трещин. В период отката волны, когда проявляется противодействие, мелкие частицы грунта обратной засыпки и основания вымываются через контр-фильтры, образуя пустоты под сооружением. Таким образом, под воздействием штормов через определенное время, происходит формирование локальных пустот в основании сооружения с последующим обрушением его конструктивных элементов. Это приводит к значительным экономическим издержкам.

На основании анализа картины силового воздействия ветровых волн на берегозащитные сооружения пассивного типа и особенностей их последующего разрушения, был разработан новый тип конструкции [1], который частично лишен некоторых из перечисленных выше недостатков. При этом, целью разработки этой конструкции, является повышение эффективности гашения волновой энергии волн, снижение волновой нагрузки в период наката волн на грунтовое основание, уменьшение противодействия при откате волн, что в конечном итоге должно привести к увеличению срока службы сооружения. Достигается это тем, что сооружение представляет собой ряд отдельных камер гашения, которые снабжены элементами внешней и внутренней шероховатости. Камера гашения состоит из двух частей – верхней 1 (рис. 1) и нижней 2 (рис. 2). На верхней части камеры, по всей ее ширине, расположены элементы внешней шерохова-

тости в виде призматических выступов 3, которые чередуются с прямоугольными сквозными отверстиями 4. На боковых стенках 5 верхней части камеры, предусмотрены прямоугольные отверстия 6. В нижней части камеры гашения, напротив прямоугольных сквозных отверстий 4 верхней части, располагаются элементы внутренней шероховатости 7. Между элементами внутренней шероховатости 7, имеются щели переменного сечения 8 для снижения величины противодавления на подошву сооружения в период отката волн. В торцах верхней 1 и нижней 2 частей камеры, предусмотрены прямоугольные отверстия 9, необходимые при сборке камер гашения, для их последующего омоноличивания бетоном между собой. С одной стороны нижней части 2, устраивается выступ 10, а с другой - паз 11, которые совместно обеспечивают надежную стыковку камер гашения при их укладке на искусственное основание. Назначение конструктивных элементов 10 и 11 состоит в том, чтобы исключить вымыв мелких частиц грунтового основания из-под днища камер гашения в фазе отката волн.



Рис. 1. Верхняя часть камеры гашения

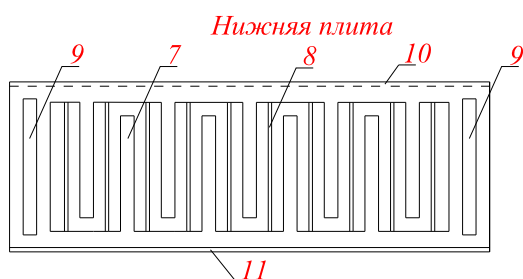


Рис. 2. Нижняя часть камеры гашения

При возведении такого типа берегозащитного сооружения (рис. 3, 4), необходимо устройство искусственного основания в виде каменной постели 12 с контр-фильтром 13. Количество слоев контр-фильтра и размеров их фракций, зависит от типа естественного грунтового основания. В подводной части сооружения на горизонтальном участке каменной постели устанавливают упорные массивы 14 с соответствующим скосом для стыковки с нижним торцом камеры гашения. В зависимости от расчетных значений донных скоростей, назначается крупность защитной наброски 15 перед упорными массивами. Надводная отметка верхнего торца камеры гашения соответствует отметке защищаемой территории.

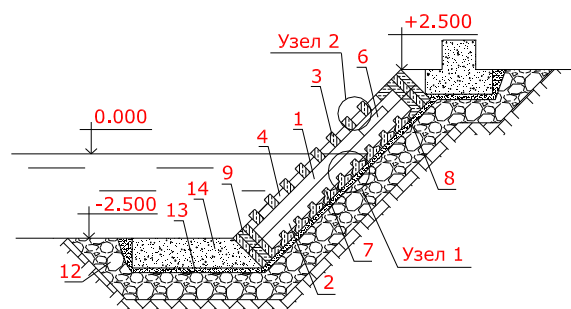


Рис. 3. Берегозащитное сооружение, состоящее из отдельных камер гашения

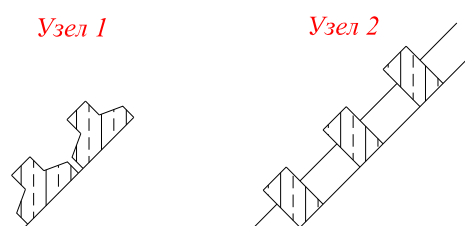


Рис. 4. Конструктивные элементы камеры гашения

Работа данного берегозащитного сооружения представляется следующим образом. В период воздействия гребня воды, благодаря элементам внешней шероховатости, будет происходить частичная диссипация волновой энергии и проникновение некоторой массы воды в камеру гашения. Проникшая

часть гребня волны в камеру, будет взаимодействовать с элементами внутренней шероховатости до полного её заполнения. Далее, благодаря боковым отверстиям, часть объема воды проникнет в незаполненные соседние блоки. После этого, если не вся масса гребня воды вместились в камеру гашения, произойдет ослабленный накат волны на верхнюю часть сооружения. В период подхода впадины, откатывающаяся из камеры гашения масса воды, окажет силовое воздействие на вновь подходящий гребень последующей волны. В фазе отката волны трапециевидные щели снижают противодействие на берегозащитное сооружение, повышая его устойчивость на грунтовом основании. При этом форма щелей камеры гашения способствует уменьшению скорости фильтрационных токов, препятствуя выносу мелких частиц грунтового основания.

Попеременное примыкание элементов внутренней шероховатости 7 к боковым стенкам 5, обеспечит полный отток воды из надводной части камер гашения после окончания шторма.

Таким образом, конструкция данного сооружения может эффективно защищать промышленные и городские территории, примыкающие непосредственно к берегам, а также откосы земляных плотин со стороны верхнего бьефа и откосы искусственных островов, возводимых на небольших глубинах воды, от разрушающего воздействия ветровых волн. Такие острова, в первую очередь, могут использоваться в качестве морских нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений для обустройства месторождений углеводородов на мелководных участках континентального шельфа. Данная конструкция, в вертикальном положении, может также применяться в качестве камеры гашения и перед оградительными сооружениями гравитационного типа. При этом будет происходить существенное снижение волновой нагрузки на сооружение, по сравнению с нагрузкой на сплошную вертикальную стенку. Исходя из этого, можно утверждать, что

предлагаемая конструкция может успешно применяться на сооружениях различного класса капитальности. По этой причине в каждом конкретном случае расчетные параметры волн будут варьироваться в широком диапазоне. Это значит, что внутренний объем блока должен соответствовать параметрам расчетной волны. Так, учитывая нерегулярный характер ветровых волн, в соответствии с предварительными расчетами, внутренний объем каждого блока должен соответствовать примерно одной трети объема воды в гребне расчетной волны. Такой волной, в зависимости от класса капитальности, проектируемого сооружения, в соответствии с рекомендациями СНиП 2.06-04 82\* [2], является волна 1% обеспеченности в системе расчетного шторма.

В зимние периоды года все гидротехнические сооружения подвергаются силовому воздействию дрейфующих ледовых образований. Наиболее опасными из них, для сооружений, возводимых на относительно небольших глубинах, являются ровные ледяные поля. Использование блоков в наклонном положении приведет к существенному снижению ледовой нагрузки, поскольку в этом случае ледяные поля будут разрушаться за счет изгиба, а не смятия и дробления. Использование блоков в вертикальном положении также приведет к снижению ледовой нагрузки благодаря концентрации напряжений при контакте ровных ледяных полей с конструктивными элементами внешней шероховатости.

Несмотря на некоторую сложность в изготовлении элементов конструкции данного сооружения, оно может успешно противостоять силовому воздействию штормовых волн, а также ровных ледяных полей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рогачко С.И.** «Берегозащитное сооружение» А.С. 776107 СССР МЕ02 В 3/04 М.,1980.

2. СНиП 2.06.04-82\* «Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)» Минстрой России, - М., 1995.
- 

Рогачко Станислав Иванович, доктор технических наук, профессор, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, кафедра гидротехнических сооружений, Украина, 65029, г. Одесса, ул. Дидрихсона 4, e-mail: rostasice@ukr.net.

Шунько Наталья Владимировна, Отраслевая научно-исследовательская лаборатория морских нефтегазопромысловых гидротехнических сооружений, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, дом 26, e-mail: natshunko@rambler.ru.

Stanislav I. Rogachko, Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Didrichsona 4, 65029, Odessa, Ukraine, e-mail: rostasice@ukr.net.

Natalia V. Shunko, Research Marine Laboratory, Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Shosse, 129337, Moscow, RUSSIA, e-mail: natshunko@rambler.ru

## ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННАЯ СИСТЕМА: ИМЕРЕТИНСКАЯ НИЗМЕННОСТЬ – ОЛИМПИЙСКИЙ КОМПЛЕКС

*А.Д. Потанов<sup>1</sup>, А.А. Лаврушевич<sup>1</sup>, А.В. Горностаев<sup>2</sup>, М.Е. Лейбман<sup>1</sup>,  
А.В. Ляпин<sup>1</sup>, И.М. Маркова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», Москва, РОССИЯ

<sup>2</sup> ГК «Олимпстрой», г. Сочи, РОССИЯ

**АННОТАЦИЯ:** Строительство ответственных сооружений в сложных условиях в сжатые сроки требует тщательного изучения природной обстановки, с формированием систем длительного наблюдения за сооружениями и изменением природных характеристик. Для решения таких задач требуется создание моделей ПТС и систем мониторинга.

**Ключевые слова:** природно-техногенная система (ПТС), мониторинг, моделирование, гидрогеологические условия, инженерно-геологические условия, олимпийские сооружения.

## NATURAL-TECHNOGENIC SYSTEM: IMERETINSKY LOWLAND – OLYMPIC COMPLEX

*Alexander D. Potapov<sup>1</sup>, Andrey A. Lavrusevich<sup>1</sup>, Alexander V. Gornostayev<sup>2</sup>  
Michail E. Lejbman<sup>1</sup>, Anton V. Ljapin<sup>1</sup>, Irina M. Markova<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, RUSSIA

<sup>2</sup> State Enterprise “Olimpstroy”, Sochi, RUSSIA

**ABSTRACT:** Building of responsible constructions in difficult conditions in deadlines demands careful studying of natural conditions, with formation of systems of long supervision over constructions and change of natural characteristics. For the decision of such problems in creation of models NTS and monitoring systems is required.

**Key words:** Natural-technogenic system (NTS), monitoring, modelling, hydro-geological conditions, engineering-geological conditions, Olympic constructions.

Современный этап развития человечества многими учеными определяется как техногенез, одной из составляющих которого является строительство, - основной средообразующий фактор.

До 30% поверхности суши застроены или нарушены горными выработками. Строительство в настоящее время представляет собой достаточно мощное средство «покорения» природы, позволяющее возводить здания и сооружения в сложных природных условиях с большой скоростью и с одновременным обеспечением их надежности, но зачастую со значительными деформациями в

природной среде. При этом проектные решения и технологические средства требуют максимальной информации об условиях природной среды. В этом отношении расположение сооружений олимпийского комплекса на Имеретинской низменности представляет собой пример создания природно-техногенной системы в исключительно сложных условиях. Сжатые сроки выполнения как проектно-изыскательских, так и строительно-монтажных работ выдвигают особые требования к получению, обобщению, анализу информации об условиях природной среды, но главное к использованию

этой информации в проектных решениях. Именно малые сроки всех видов работ определяют необходимость научного сопровождения реализации «олимпийского проекта». Одной из задач, которые необходимо решать в этом проекте являются сооружения инженерной защиты. Здесь следует остановиться на следующем: олимпийские органы выдвигают жесткие экологические параметры для всего комплекса, а это в очень большой степени относится к сооружениям инженерной защиты. Собственно конструктивные решения по инженерной защите найдены, но важнейшим элементом ее устойчивого экологического функционирования должна стать создаваемая система мониторинга по всем параметрам среды.

*Цель мониторинга:* контроль состояния окружающей среды при производстве работ по инженерной защите территории Имеретинской низменности.

*Объект мониторинга:* мероприятия и сооружения инженерной защиты территории Имеретинской низменности.

*Составляющие мониторинга:* гидрогеологический мониторинг подземных вод; мониторинг безопасности берегозащитных сооружений и литодинамический мониторинг на участке берегоукрепления; экологический мониторинг и инженерно-геологический (геотехнический) мониторинг.

*Характеристика природно-техногенной системы.*

Имеретинская низменность расположена в междуречье рек Мзымта и Псоу и относится к Адлерскому району города Сочи. Она протягивается вдоль побережья Черного моря на 8 км., представляя собой низкую приморскую равнину, которая переходит в пологохолмистые предгорья. Территория Имеретинской низменности сформировалась в пределах аллювиально-морской террасы, протянувшейся вдоль берега моря от устья р.Псоу до устья р.Мзымта. Поверхность низменности незначительно приподнята над уровнем моря в среднем от 1,5 м до 4,0 м, значительные ее площади заболочены и под-

вержены подтоплению. В центральной части наблюдается участок с отметками ниже уровня моря.

Отложения, слагающие верхнюю часть геологического разреза, представлены аллювиальными и морскими дисперсными грунтами от гравийно-галечникового состава до илов. В прибрежной части с поверхности преобладают гравийно-галечниковые грунты, а в северо-западной части территории отведенной под строительство олимпийской деревни залегают илы, иловатые суглинки с прослоями торфа, мощность этих грунтов достигает 40 м. Ниже они подстилаются адлерскими глинами, которые представляют собой дисперсный грунт с невысокими прочностными и деформационными характеристиками.

Некоторые полигенетичные грунты могут быть подвержены разжижению при динамическом воздействии, что актуально в связи с тем, что район отличается исключительно высокой сейсмичностью. Прежде всего, это слабые иловатые глины, ил, торф, суглинки, супеси и пески, содержащие пылеватую фракцию, что существенно осложняет разработку проектных решений по объектам.

Совокупность изложенных выше факторов позволяет отнести данную территорию к III категории сложности инженерно-геологических условий (сложные) [СП 11-105-97, приложение Б].

Гидрогеологические условия характеризуются развитием верховодки и комплекса водоносных горизонтов в четвертичных и неоген-палеогеновых, аллювиальных и морских отложениях. Глубина залегания грунтовых вод меняется в течение года, в дождливые периоды на отдельных участках выходит на поверхность. В среднем, глубина залегания грунтовых вод колеблется от 0,5 до 4 м.

Из всего многообразия природных процессов на исследуемой площади наибольшее развитие имеют подтопление территории для приморской части впадины и абразия береговой линии Черного моря. Кроме того к опасным экзогенным процессам, развитым на территории Имеретинской низменности

относятся оползневые процессы на её холмистых предгорьях, речная эрозия, паводковое затопление, суффозия, карст и др.

На основании материалов изысканий прошлых лет, а также фактического материала полученного в ходе инженерно-геологических изысканий под олимпийские объекты была разработана схема инженерной защиты территории Имеретинской низменности от подтопления. Схема инженерной защиты представляет отсыпку территории с подъемом отметок поверхности до уровня 2,5 -3,5 м и закладку горизонтального дренажа. Консолидация грунтов оснований и инженерной защиты может вызвать нежелательное изменение уклонов по трассам дренажей и отводящих коллекторов. Основные требования к грунтам в теле насыпи согласно проектной документации: коэффициент фильтрации не менее 2 м/сутки содержание глинистых частиц не более 10%, коэффициент уплотнения не менее 0,95.

Абразионные процессы в пределах береговой линии Имеретинской низменности активизировались в последние десятилетия и привели к отступанию береговой линии в среднем на 10м, при максимальном отступлении до 20м.

Процесс миграции наносов нестабилен, особенно с учетом сложного подводного рельефа в пределах территории и активной техногенной нагрузки (строительство морского порта в устье реки Мзымта). Укрепление береговой линии планируется воссозданием пляжа и поддержанием его ежегодными подсыпками.

При отмеченной сложности существующих инженерно-геологических, гидрогеологических и океанологических условий территории Имеретинской низменности и прибрежной зоны в ходе освоения территории неизбежно развитие опасных геологических процессов. Это подтопление, затопление и заболачивание территории, увеличение зоны интрузии морских соленых вод вглубь побережья, суффозия, неравномерная консолидация грунтов на площадях инженерной защиты,

переформирование морского дна прибрежной зоны и разрушение берегоукрепительных сооружений. Значительная техногенная нагрузка оказывает негативное воздействие на компоненты экосистемы территории.

Создание системы мониторинга за сооружениями инженерной защиты позволит решить задачу обеспечения безаварийной работы олимпийского комплекса в период его эксплуатации с соблюдением экологических требований.

Одной из перспективных задач данного этапа научного сопровождения представляется создание комплексной модели функционирования сооружений инженерной защиты в период эксплуатации в рамках экологических параметров. Такая модель должна быть постоянно действующей и позволяющей получать информацию об элементах системы инженерной защиты.

Важнейшим в функционировании такой модели является постоянное и непрерывное обеспечение ее полной и достоверной информацией о параметрах среды в вышеописанных составляющих мониторинга. Собственно это является граничными условиями для описания модели.

Среди перечисленных негативных геологических процессов наиболее важным, естественно не умаляя роли сеймики, представляется техногенное подтопление территории. Этот процесс рассматривается более подробно. Собственно подтопление реализуется в результате резкого увеличения приходной части естественного водного баланса за счет утечек и других искусственных источников и факторов, что приводит к быстрому (до 1м и более в год) и значительному по площади подъему уровня подземных вод. При этом резко изменяется химический состав подземных вод: повышается агрессивность к заглубленным конструкциям и их температура (она может достигать 25-40 градусов и больше).

Для заблаговременного предотвращения этих процессов и разработки защитных мероприятий необходимо широкое применение

вероятностного прогноза оценок потенциальных изменений наряду с экспертными методами оценок. Базой этих оценок должны стать стационарные режимные наблюдения, методика которых различается на участках с различными типами застроек и геолого-гидрогеологическими условиями и построение математической модели. При этом необходимо учитывать, что на урбанизированных территориях всегда происходит перестройка водного баланса в системе: осадки – поверхностные воды – воды зоны аэрации – грунтовые воды – подземные воды.

Из составленной карты глубин залегания подземных вод Имеретинской низменности следует, что уровни грунтовых вод по всей территории изменяются от 0 м до 3 м.

Наибольшие глубины залегания грунтовых вод (2-3 м) наблюдаются в узкой полосе распространения делювиальных суглинков в тыловой части низменности, а также сохраняются узкой полосой в зоне распространения береговых валов нимфейской террасы. Центральная часть низменности отличается залеганием уровней грунтовых вод не превышающих 0,5 м с отдельными небольшими участками затопления в наиболее пониженных местах.

Сравнение современных положений уровней грунтовых вод с данными Адлерской комплексной станции (1961-62 гг.) и Союзводстроя (1974-75 гг.) показывает, что общий характер уровня грунтовых вод в целом не претерпел за этот период каких-либо существенных изменений, что также подтверждает аналогичная модель разработанная ОАО «ДарводГЕО»

Общий характер гидроизогипспостроенных по гидропостам в разные годы можно считать относительно унаследованным.

По положению гидроизогипс выделяется три основных грунтовых потока, формирующихся в пределах Имеретинской низменности.

1. Грунтовой поток аллювиальных вод, движущийся с северо-запада из долины р. Мзымты. Он связан с подземными водами голоценовой и высокой карангатской аллю-

виальных террас и разворачивается южнее мыса высокой террасы практически в перпендикулярном направлении к центральной части низменности, отодвигая на восток границу хлоридно-гидрокарбонатных и гидрокарбонатно-хлоридных вод.

2. Грунтовой поток идущий со стороны предгорий разделяется на два потока – западный и восточный. В западной части радиально расходящийся характер гидроизогипс отмечается в пределах развития относительно водоупорных склоновых отложений залегающих на водоупорной майкопской толще, и составляет, очевидно, небольшую долю в приходной составляющей баланса, о чем говорит застойный характер подземных вод с повышенной до 3,7 г минерализацией и хлоридно-гидрокарбонатным и гидрокарбонатно-хлоридным типом подземных вод, установленным по всем скважинам в этой части низменности.

Восточный поток выделяется в полосе примыкания Имеретинской низменности к понтическому водоносному горизонту. Здесь характер гидроизогипс меняется на радиально-вогнутый, с резким выдвиганием нулевой отметки к тыловой части низменности, где формируется довольно мощный грунтовой поток со стороны понтической гравийно-галечниковой толщи, которому мало препятствуют сохранившиеся фрагментарно в верхней части разреза маломощные водоупорные среднечерноморские слои. Грунтовые воды в этой части Имеретинской низменности повсеместно гидрокарбонатные с минерализацией не превышающей 0,5 г/л.

3. Грунтовой поток аллювиальных вод, направленный с северо-востока со стороны р. Псоу, характеризуется радиально выпуклыми линиями гидроизогипс в пределах распространения голоценового аллювиального водоносного горизонта. Этот поток составляет наибольшую приходную часть баланса грунтовых вод низменности, что обеспечивается высокими фильтрационными свойствами и сходным литологическим составом аллювиального и морского водоносных го-

ризонтов. В присклоновой части затруднение водообмена между этими горизонтами связано со значительно более низкими фильтрационными свойствами (до 1-2 м/сут) сохранившихся останцов морских карангатских отложений, залегающих на глубинах 15-25 м и фактически барражирующих в этом месте аллювиальный грунтовый поток из р. Псоу, что хорошо видно по характерному изгибу линий гидроизогипс.

В центральной части низменности, где режим грунтовых вод находится в непосредственной зависимости от принудительного дренажа, выделяется обширная площадь, фиксируемая по нулевой гидроизогипсе, где уровни грунтовых вод располагаются ниже уровня моря и устанавливаются на абсолютных отметках до минус 1 м. Эта территория является наиболее уязвимой в случаях отказа в работе осушительной системы. Её современные границы значительно превышают площадь естественного затопления, выделяемую в этой части низменности до строительства осушительной системы.

Решения по инженерной защите территории в виде повышения поверхности на 2-3 метра на большей части Имеретинской низменности безусловно вызовет изменение общей гидрогеологической обстановки. Слабые грунты представленные илами, заторфованными суглинками и торфами в результате пригрузки площадок начнут приспособляться к новым гидродинамическим условиям. Пойдет процесс консолидации водонасыщенных слабых грунтов, который приведет к перераспределению направлений потоков грунтовых вод.

1. Поток аллювиальных подземных вод северо-запада связанный с подземными водами голоценовой и высокой аллювиальных террас очевидно развернется в южном направлении, параллельно движению подруслового потока р. Мзымта с разгрузкой в море.

2. Грунтовые потоки предгорий также изменят направление движения. Не ясен характер поведения восточного потока связанного с понтическим напорным водоносным гори-

зонтом. Здесь, в связи с консолидацией слабых грунтов в центральной части, возможно перенаправление потока к восточной части низменности. Воды понтического горизонта (N1-2 р) напорные и нарушение их взаимодействия с вышележащими водоносными горизонтами может привести к их выходу на поверхность именно в предгорной части территории, нарушая общий баланс и характер движения грунтовых потоков.

3. Грунтовый поток аллювиальных вод с северо-востока со стороны р. Псоу в результате пригрузки центральной части территории, также развернется к югу с разгрузкой в море. Уточнит данную ситуацию карта гидроизогипс, построенная по результатам мониторинга 2011-2012 гг.

Среди большого числа разработанных программ для проведения численного моделирования фильтрации наиболее часто используемой программой в настоящее время является программный комплекс Геологической службы США MODFLOW, ставшей во всем мире стандартом для фильтрационных расчетов в сложных гидрогеологических условиях.

Важной проблемой при моделировании является определение граничных условий моделируемой области. Рассматривая Имеретинскую низменность напрашивается введение ограничений естественными границами: с запада и востока устья рек Мзымта и Псоу, с юга - акватория Черного моря, с севера предгорья Главного Кавказского Хребта, идущие параллельно морю. Однако, проведенный анализ гидрогеологических условий и анализ многолетних стационарных наблюдений еще недавно существовавшей режимной гидрогеологической сети Имеретинской низменности показывает более сложную картину чем предложенная нам природой.

Основной поток фильтрации направлен от долин рек Мзымты и Псоу. Его разгрузка происходит в пониженной части Имеретинской долины в дренажную систему и в Черное море. Разгрузка основного горизонта в пределах распространения лиманных глин

происходит за счет вертикальной фильтрации через их толщу. Поступающая снизу вода отводится проектируемым систематическим дренажем, расход которого составил 19 тыс. м<sup>3</sup>/сут. В качестве примера показан геолого-литологический разрез по направлению от предгорий к Черному морю, на котором показана общая геолого-гидрогеологическая обстановка в пределах Имеретинской низменности (И.П.Балабанов, 2009).

На рассматриваемой территории в настоящее время отсутствует закрытая сеть дождевой канализации. Отвод поверхностных вод по открытым лоткам производится в реки Мзымта и Псоу.

В целях повышения общего уровня благоустройства городской территории, создания необходимых условий работы автомобильных и пешеходных магистралей, а также в соответствии с требованиями градостроительных норм и правил, проектом предусматривается организация поверхностного стока.

Инженерная защита согласно проектным решениям заключается в подсыпке территории песчано-гравийной смесью с коэффициентом фильтрации не менее 2 м/сут.

В соответствии с принятыми решениями по повышению планировочных отметок территории изменяются балансовые составляющие питания грунтовых вод. Кроме мероприятий по повышению планировочных отметок на балансовые составляющие питания грунтовых вод оказывают влияние и другие факторы, связанные со строительным освоением территории, что вызовет техногенную составляющую баланса в виде дополнительного инфильтрационного питания.

В связи с этим возникает необходимость оценки изменения уровня грунтовых вод при строительном освоении территории.

При проектировании и осуществлении мероприятий инженерной защиты (повышения отметок) территории Имеретинской низменности необходимо соблюдать условия естественного и искусственного дренирования подземных вод. Недопустима отсыпка территории грунтами, имеющими фильтраци-

онные показатели меньше 1 м/сутки. В противном случае искусственное повышение отметок территории приведет к подтоплению прилегающих территорий, а также может вызвать существенное ухудшение условий при производстве работ.

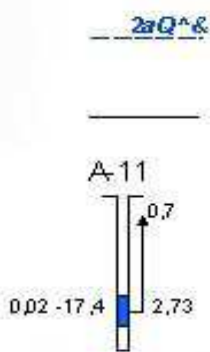
## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайцев И.К. О глубине распространения и закономерностях формирования в литосфере свободных подземных вод. В кн.: Формирование подземных вод как основа гидрогеологических прогнозов. Материалы I Всесоюзной гидрогеологической конференции, Т.1. М.: Наука, 1982. С.283-285.
2. Ковалевский В.С. Закономерности формирования режима подземных вод как основа его прогнозов. В кн.: Формирование подземных вод как основа гидрогеологических прогнозов. Материалы I Всесоюзной гидрогеологической конференции, Т.1. М.: Наука, 1982. С.310-314.
3. Плотников Н.И., Карцев А.А. Прогноз влияния техногенеза на изменение гидрогеологической обстановки. В кн.: Формирование подземных вод как основа гидрогеологических прогнозов. Материалы I Всесоюзной гидрогеологической конференции, Т.2. М.: Наука, 1982. С.176-186.
4. Зверев В.П. Роль процессов взаимодействия воды и породы в формировании химического состава подземных вод зоны активного водообмена. В кн.: Формирование подземных вод как основа гидрогеологических прогнозов. Материалы I Всесоюзной гидрогеологической конференции, Т.2. М.: Наука, 1982. С.310-314.
5. Карцев А.А. Палеогидрогеология. М.: Недра. 1969. 151с.
6. Балабанов И.П. Палеогеографические предпосылки формирования современных природных условий и долгосрочный прогноз развития голоценовых террас Черноморского побережья Кавказа. Москва-Владивосток, 2009.350с.
7. Тютюнова Ф.И., Сафохина И.А., Швецов. Техногенный регрессивный литогенез. М.: Наука, 1988. 238 с.
8. Горшков С.П. Концептуальные основы геоэкологии. Смоленск, 1998.448с.

---

Потапов Александр Дмитриевич, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой инженерной геологии и геоэкологии, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, дом 26; e-mail: umu-potapov@mail.ru





Линия пьезометрического (статического) уровня подземных вод.  
Вверху - индекс гидрогеологического подразделения

Литологическая граница

Скважина. Вверху - номер скважины, закрашка соответствует химическому типу воды в опробованном интервале. Стрелка соответствует напору подземных вод, цифры у стрелки - глубина установившегося уровня, м. Цифры слева от интервала опробования: первая - дебит, л/с, вторая - понижение, м, справа - минерализация воды, г/л

#### Литологический состав пород

	Валунно-галечниковые отложения
	Галечниково-гравийные отложения с песчаным заполнителем
	Галечниково-гравийные отложения с глинистым заполнителем
	Пески
	Супинки
	Глины
	Ариллиты
	Алевролиты
	Песчаники
	Гравийные и галечниковые конгломераты
	Мергели
	Известняки
	Дресвяно-щебенистые отложения
а)	Торф с мощностью, выраженной в масштабе разреза (а), и внемасштабный знак (б)
б)	

Лавруевич Андрей Александрович, канд. геолого-минералогических наук, доцент кафедры инженерной геологии и геоэкологии, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, дом 26. e-mail: lavrusevich@yandex.ru

Markova Irina M, PhD. t. Sciences., Associate Professor of Department, Vice-Head of the EIC of the Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Russia, Moscow, Yaroslavl highway, 26; e-mail: csr@mgsu.ru

Горностаев Александр Васильевич, Вице-президент ГК «Олимпстрой»; 354000, Российская Федерация, Краснодарский край, г. Сочи, Курортный проспект, д. 37, e-mail: info@mail.sc-olympstroy.ru

Лейбман Михаил Евгеньевич, проректор по научно-производственной деятельности, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, дом 26. e-mail: csr@mgsu.ru

Ляпин Антон Валерьевич, канд. т.наук. старший научный сотрудник, руководитель ЭИЦ, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, дом 26; e-mail: csr@mgsu.ru

Маркова Ирина Михайловна, кандидат технических наук, доцент, заместитель руководителя ЭИЦ, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, дом 26; e-mail: csr@mgsu.ru

Potapov, Alexander D., Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Engineering Geology and Geoecology, Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Russia, Moscow, Yaroslavl highway, 26; e-mail: umu-potapov@mail.ru

Lavrusevich Andrey A. PhD. Geology and Mineralogy Sciences, Associate Professor of Engineering Geology and Geoecology, Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Russia, Moscow, Yaroslavl highway, 26; e-mail: lavrusevich@yandex.ru

Gornostayev Alexander V., State Enterprise “Olympstroy”, Vice-president; 354000, Russia, Krasnodarskiy kray, Sochi, Kurortnyi prosp, 37; e-mail: info@mail.sc-olympstroy.ru

Leibman Michail E., vice-rector for research and production activities of the Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Russia, Moscow, Yaroslavl highway, 26; e-mail: csr@mgsu.ru

Lyapin Anton V., PhD. t. Sciences, Senior Researcher. et al. Head of EIC, Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Russia, Moscow, Yaroslavl highway, 26; e-mail: csr@mgsu.ru

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛНЕНИЯ С ПРОЕКТИРУЕМЫМИ БЕРЕГОУКРЕПИТЕЛЬНЫМИ СООРУЖЕНИЯМИ ИМЕРЕТИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

*Р.М. Тлявлин, Г.В. Тлявлиная, С.Ю. Дроботко*  
Филиал ОАО ЦНИИС «НИЦ «Морские берега», г. Сочи, РОССИЯ

**АННОТАЦИЯ:** Предметом исследования данной работы являются берегоукрепительные сооружения Имеретинской низменности. Целью данной работы является исследование методом физического моделирования взаимодействия волн расчетных штормов повторяемостью 1 раз в 50 лет с берегоукрепительными сооружениями с учетом их конструктивных особенностей, планового расположения и влияния подводных каньонов.

**Ключевые слова:** физическое моделирование, волнение, берегоукрепительные сооружения, взаимодействие, Имеретинская низменность

## PHYSICAL MODELING OF INTERACTION OF WAVES WITH COASTAL PROTECTION STRUCTURES IN IMERETINSKAYA LOWLAND

*Roman M. Tlyavlin, Galina V. Tlyavlin, Sergey Yu. Drobotko*  
Russia Branch of Scientific Centre "Sea Coasts", Sochi, RUSSIA

**ABSTRACT:** The subject of research of this paper are the coastal protection structures in Imeretinskaya lowland. The aim of this paper is to study by physical modelling of interaction of waves of storms repeatability of 1 every 50 years with coastal protection structures according to their structural features, the planned location and the influence of submarine canyons.

**Key words:** physical modelling, waves, coastal protection structures, interaction, Imeretinskaya lowland

Объектом исследования являлись берегозащитные сооружения и пляж Имеретинской низменности протяжением 1,6 км, расположенные в Адлерском районе г.Сочи в междуречье Мзымта-Псоу юго-восточнее строящегося порта, включенные в пункт 69 Программы строительства олимпийских спортивных объектов и развития города Сочи как горноклиматического курорта, утвержденной Правительством Российской Федерации. В настоящее время на рассматриваемом фрагменте берега из-за перехвата гидротехническими сооружениями строящегося порта вдольберегового потока наносов, направленного от устья р.Мзымта в сторону р.Псоу,

начались размывы естественного галечного пляжа. Это создало угрозу подмыва территории Имеретинской низменности, сложенной легкоразмываемыми отложениями, представленными древними аллювиальными выносами рек Мзымта и Псоу. В связи с этим возникла необходимость защиты территории, на которой расположены олимпийские объекты, от размыва штормовыми волнами. Основной задачей исследований являлась оценка взаимодействия расчетного волнения с проектируемыми берегоукрепительными сооружениями с учетом их конструктивных особенностей, планового расположения и влияния подводных каньонов.

Экспериментальные исследования по определению волногасящей способности проектируемых сооружений и пляжа для берегоукрепления Имеретинской низменности были проведены в волновом бассейне НИЦ «Морские берега».

Бассейн в плане имеет форму равнобедренной трапеции с основаниями 41 м и 25 м и расстоянием между ними – 31,5 м. Высота стенок бассейна – 1,7 м. Бассейн оснащен передвижными волнопродукто-рами, которые представляют собой группу однотипных установок, обеспечивающих возвратно-поступательное движение щитов. Для совместной работы, секции объединены посредством синхронизирующего вала и карданных соединений. Длина щита одной секции – 5 м при высоте – 1 м. В проводимых экспериментах было использовано четыре секции общей длиной 20 м. В соответствии с выбранным масштабом  $m \ell = 1 : 80$  в волновом бассейне была построена модель рассматриваемого участка берега и дна до изобаты 70 м протяженностью вдоль берега 1600 м от ПК16 до ПК32. План модели показан на рисунке 1.

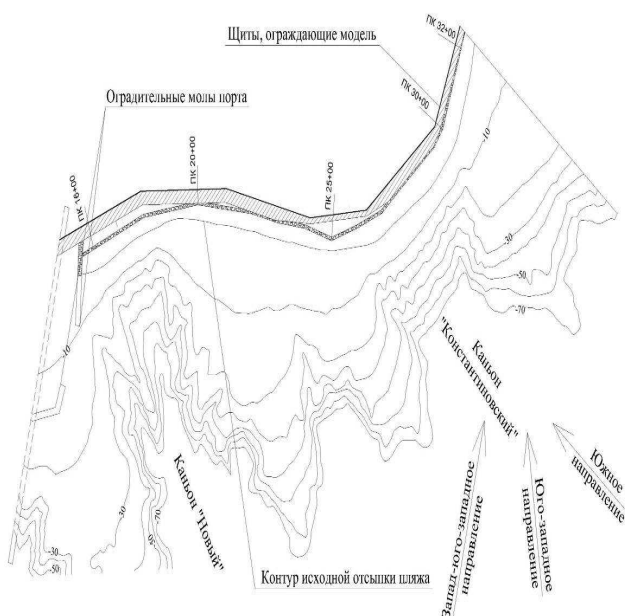


Рис. 1. План модели исследуемого участка берега

В связи с тем, что подводный склон на участке берега между устьями рек Мзымта и Псоу сложен несвязными (рыхлыми) отложениями, для оценки возможных его деформаций и размывов при воздействии волн на модели до изобаты 10,0 см (или 8,0 м в натуре) он отсыпался из рыхлого материала. Мористее этой изобаты подводный склон был выполнен в виде бетонной стяжки.

Размываемая часть берегового склона и галечный пляж моделировались наносами со средней крупностью  $d_{50\%} = 1,09$  мм. В натуральных условиях им соответствовали наносы с  $d_{50\%} = 87,2$  мм.

Особенности рельефа подводного склона исследуемого участка берега и наличие подводных каньонов обуславливают сложные процессы рефракции и трансформации штормовых волн при их подходе к берегу и существенное изменение их высоты вдоль фронта берегозащитных сооружений. Воспроизведение рельефа дна на модели до глубины 70 м позволило задавать параметры волн на глубокой воде, а картину волнового поля в прибойной зоне получать автоматически близкой к реальной в натуре. При этом предоставляется возможность оценивать взаимодействие волн с проектируемыми берегозащитными сооружениями по результатам воздействия волн 1% обеспеченности в системе шторма, а литодинамические процессы, включая вдольбереговое перемещение пляжевого материала, по параметрам волн 13% обеспеченности.

Исследования на физической модели в волновом бассейне выполнялись для условий штормов повторяемостью 1 раз в 50 лет трех направлений: запад-юго-западного (ЗЮЗ), юго-западного (ЮЗ) и южного (Ю). Параметры волн расчетных штормов на глубине 70 м (на подходе к модели), представлены в таблице 1.

В таблице 2 в соответствии с принятым масштабом  $M 1:80$  представлены параметры волн для моделирования взаимодействия расчетных волн с проектируемыми сооружениями и пляжем.

Таблица 1 – Параметры расчетных волн на глубине 70 м, принятые для моделирования

Направление	$h_{13\%}$	$h_{1\%}$	$T_{13\%}$	$T_{1\%}$
ЗЮЗ	7,63	11,04	13,2	16,1
ЮЗ	7,02	10,61	8,0	8,65
Ю	5,15	7,68	11,0	13,1

Таблица 2 – Параметры расчетных волн на глубокой воде, на модели

Направление	$h_{13\%}$	$h_{1\%}$	$T_{13\%}$	$T_{1\%}$
ЗЮЗ	9,5	13,8	1,48	1,80
ЮЗ	8,8	13,3	0,89	0,97
Ю	6,4	9,6	1,23	1,46

Продолжительность каждого эксперимента (опыта) на модели принята равной 4 часа, что соответствует средней продолжительности штормов, составляющей 36 часов. Всего было проведено две серии опытов. Для подтверждения подобия волновых и литодинамических процессов на модели натурным была выполнена первая серия, состоящая из четырех опытов, в которой оценивалось воздействие волн расчетных штормов на берег в «естественном» состоянии, то есть берег на начало 2007 г. с галечным пляжем и дамбой из мелкого камня с отметками в натуре от ПК 16 до ПК 25 +4,3 м абс., а от ПК 25 до ПК 32 +5,0 м абс. и шириной по верху 4,8 м. Во второй серии, состоящей из шести опытов, выполнены исследования взаимодействия волн расчетных штормов с проектируемыми берегозащитными сооружениями. Проектируемая система берегозащиты включает галечный пляж шириной 50 м и пронизаемое откосное сооружение, состоящее из бетонного ростверка сечением 1,62x1,1 м на сваях с отметкой верха +2,5 м абс. и откоса дамбы, укрепленного бетонными кубами размером 1,0x1,0x1,0 м. Бетонные

блоки имеют отверстия в трех плоскостях диаметром 30 см. Блоки соединены между собой по углам металлическими кольцами на сварке. В результате верхняя часть сооружения получается в виде бетонного перфорированного откоса с отметкой верха +4,5 м абс. На модели эта часть сооружения выполнена из бакелитовой фанеры толщиной 1,2 см с отверстиями диаметром 3,8 мм. Поперечный профиль модели с проектными сооружениями показан на рисунке 2.

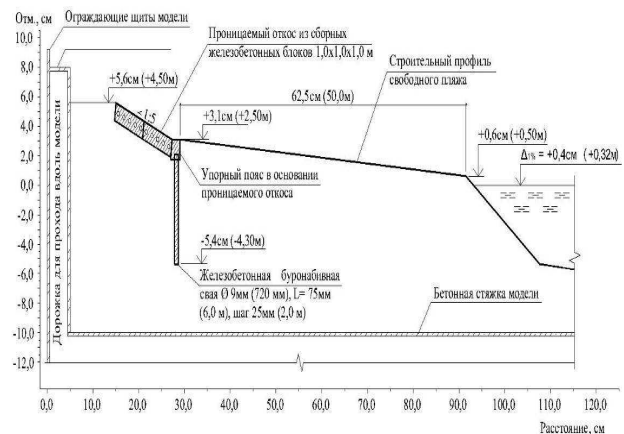


Рис. 2. Поперечный профиль модели с проектными сооружениями (на рисунке в скобках указаны натурные величины)

Уровень наполнения бассейна водой во всех опытах соответствовал расчетному уровню моря 1% обеспеченности  $\Delta 1\% = +0,32$  м БС. На основании выполненных исследований получены следующие результаты:

1. Проведенные эксперименты первой серии подтвердили необходимость защиты берега в условиях прекращения поступления наносов реки Мзымта. Существующая каменнонабросная дамба, расположенная в верхней части пляжа, не обеспечивает полного гашения наката волн. Переливы на модели отмечались в тех же местах, что и наблюдались в натуре во время штормов редкой повторяемости (напротив каньонов «Новый» и «Константиновский»), что качественно подтверждает подобие волновых и литодинамических процессов на модели натурным. Переливы через существующую дамбу на модели во время эксперимента показаны на рисунке 3.



*Рис. 3. Перелив волн через дамбу у каньона «Новый»*



*Рис. Накат волн на проектируемые сооружения с перемещением пляжевого материала вблизи каньона «Новый»*

2. Проектируемые берегозащитные сооружения с пляжем шириной 50 м, исследуемые во второй серии экспериментов, не обеспечивают полного гашения волн обеспеченностью 13% в зоне каньонов при штормах южного и запад-юго-западного направлений (рисунок 4). Прибойный поток при разрушении этих волн пересекает галечный пляж, накатывается на откосное крепление и переливается через его верх.

3. При южных и запад-юго-западных штормах преобладает косой подход волн, интенсивный вдольбереговой перенос пляжевого материала и сокращение пляжевой полосы вблизи каньонов. Размыв пляжа перед ростверком приводит к выносу грунта из-под откосного крепления и его деформации (рисунок 5). Одновременно возрастает перелив волн через верх сооружения.

4. При штормах юго-западного направления для большей части рассматриваемого фрагмента берега характерен фронтальный подход волн и вдольбереговой перенос материала слабо выражен. Волны обеспеченностью 13% гасятся, в основном, на пляже, даже в зоне каньонов накат на откосное крепление не превышает половины его высоты.



*Рис. 5. Оголение свай и садка блоков пронцаемого откоса у каньона «Константиновский» в середине опыта*

5. Волны обеспеченностью 1% при всех рассмотренных направлениях в зоне каньонов переливаются через верх сооружения. Интенсивный размыв пляжа при южных и запад-юго-западных штормах приводит к подмыву основания откосного крепления и его разрушению.

В настоящее время ведется строительство проектируемых сооружений в Имеретинской низменности и некоторые результаты экспериментальных исследований на модели в волновом бассейне уже находят подтверждение. Так, во время штормов частой повторяемостью отмечено, что пляжевый материал, ранее прикрывавший бетонный ростверк во время шторма, оттягивается от сооружения. Ростверк оголяется, уменьшается ширина пляжа, и соответственно увеличиваются переливы через откосное сооружение (рисунки 6-8). При этом необходимо отметить, что данное сооружение построено пока не в самых волноопасных местах, на модели основные разрушения отмечались в районе каньона «Константиновский» и в районе существующего оградительного мола порта, где в настоящее время построен только ростверк на сваях (рисунок 9).



*Рис. 6. Перелив через построенное сооружение*



*Рис. 7. Оттягивание пляжа от сооружения и оголение ростверка во время шторма*



*Рис. 8. «Жёсткое» взаимодействие волн с сооружением*



*Рис. 9. Вид ростверка на сваях после шторма в районе оградительного мола порта*

Тлявлин Роман Маратович, кандидат технических наук, заместитель директора филиала, Филиал ОАО ЦНИИС «Научно-исследовательский центр «Морские берега» г. Сочи (НИЦ «Морские берега»); 354002, Краснодарский край, г. Сочи, Яна Фабрициуса ул., д. 1; тел.: (8-8622) 67-20-26, тел./факс: (8-8622) 67-16-10; e-mail: TlyavlinRM@Tsniis.com

Тлявлиная Галина Вячеславовна, кандидат технических наук, Филиал ОАО ЦНИИС «Научно-исследовательский центр «Морские берега» г. Сочи (НИЦ «Морские берега»); 354002, Краснодарский край, г. Сочи, Яна Фабрициуса ул., д. 1; тел.: (8-8622) 67-20-26, тел./факс: (8-8622) 67-16-10

Дроботько Сергей Юрьевич, Филиал ОАО ЦНИИС «Научно-исследовательский центр «Морские берега» г. Сочи (НИЦ «Морские берега»); 354002, Краснодарский край, г. Сочи, Яна Фабрициуса ул., д. 1; тел.: (8-8622) 67-20-26, тел./факс: (8-8622) 67-16-10.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ВОЛН РАСЧЕТНЫХ ШТОРМОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПОДВОДНЫХ КАНЬОНОВ

*В.М. Шахин<sup>1</sup>, Т.В. Шахина<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ООО «Гидротехника», г. Сочи, РОССИЯ

<sup>2</sup>Государственный южный научно-исследовательский полигон РАН, г. Сочи, РОССИЯ

**АННОТАЦИЯ:** В работе на базе современной рефракционно-дифракционной математической модели численно решены задачи о трансформации штормовых волн при их распространении из глубоководной зоны до прибрежной.

**Ключевые слова:** волны, каньоны, рефракция, дифракция, математическая модель

## MATHEMATICAL SIMULATION OF ESTIMATED STORM WAVES TRANSFORMATION CONSIDERING THE EFFECT OF UNDERWATER CANYONS

*V.M. Shakhin<sup>1</sup>, T.V. Shakhina<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>“Hidrotechnika” LLC, Sochi, RUSSIA

<sup>2</sup> State Southern Research Testing Ground of Russian Academy of Sciences, Sochi, Russia

**ABSTRACT:** The study represents a numeric solution of problems in respect of storm waves transformation while moving from deep water to foreshore basing on the modern refractive-diffractive mathematical simulation.

**Key words:** waves, canyons, refraction, diffraction, mathematical simulation

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основные уравнения для описания волнового движения невязкой несжимаемой жидкости имеют вид [1]

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (4)$$

В этих уравнениях:

$x, y, z$  - декартова система координат, в которой плоскость  $xy$  является горизонтальной и совпадает со свободной поверхностью в невозмущенном состоянии, ось  $z$  направлена вертикально вверх;

$u, v, w$  - компоненты вектора скорости жидкости по осям  $x, y, z$  соответственно;

$t$  - время;

$g$  - ускорение свободного падения;

$p$  - давление;

$\rho$  - плотность жидкости.

Предположим, что волнение регулярное и давление описывается зависимостью

$$p = -\rho g z + \rho g \frac{chm(d+z)}{chmd} \eta, \quad (5)$$

где  $d$  - глубина;  
 $m = 2\pi/\lambda$  - волновое число;  
 $\lambda$  - длина волны;  
 $\eta$  - отклонение свободной поверхности от невозмущенного уровня.  
 С учетом этих предположений и дисперсионного соотношения

$$m = \frac{k^2}{g} \operatorname{cth} md, \quad (6)$$

где  $k = 2\pi/T$  - круговая частота;  
 $T$  - период волн,  
 проинтегрируем уравнения (1)-(3) по глубине.  
 Осредненное по глубине уравнение неразрывности может быть записано в виде

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} d \cdot U + \frac{\partial}{\partial y} d \cdot V = 0, \quad (7)$$

где  $U, V$  - осредненные по глубине компоненты скорости  $u, v$ .  
 Интегрирование по глубине уравнения (2) выполняем в следующей последовательности

$$\int_{-d}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial t} dz = - \int_{-d}^{\eta} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} dz. \quad (8)$$

Поскольку

$$\int_{-d}^{\eta} \frac{\partial f}{\partial \xi} dz = \frac{\partial}{\partial \xi} \int_{-d}^{\eta} f dz - f(\eta) \frac{\partial \eta}{\partial \xi} + f(-d) \frac{\partial(-d)}{\partial \xi},$$

где  $f$  - некоторая функция;  
 $\xi$  - переменная, то

$$\int_{-d}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial t} dz = \frac{\partial}{\partial t} \int_{-d}^{\eta} u dz - u(\eta) \frac{\partial \eta}{\partial t} + u(-d) \frac{\partial(-d)}{\partial t}, \quad (9)$$

$$\int_{-d}^{\eta} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} dz = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-d}^{\eta} p dz - \frac{1}{\rho} p(\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} p(-d) \frac{\partial(-d)}{\partial x}. \quad (10)$$

Так как рассматривается линейная задача и  $\frac{\partial d}{\partial t} = 0$ , можем записать

$$\int_{-d}^{\eta} \frac{\partial u}{\partial t} dz = d \frac{\partial U}{\partial t}.$$

Рассмотрим правую часть уравнения (10). Подставив в первый член зависимость (5), получим

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-d}^{\eta} p dz &= g \frac{\partial}{\partial x} \int_{-d}^{\eta} \left[ -z + \frac{\operatorname{ch} m(d+z)}{\operatorname{ch} md} \eta \right] dz = \\ &= gd \frac{\partial d}{\partial x} + g \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\operatorname{th} md}{m} \eta \right). \end{aligned}$$

Здесь также учтены лишь члены первого порядка малости. Второй член этого уравнения равен нулю, т.к.  $p(\eta) = 0$ , а последний член равен

$$\frac{1}{\rho} p(-d) \frac{\partial(-d)}{\partial x} = -g(d + \frac{\eta}{\operatorname{ch} md}) \frac{\partial d}{\partial x}$$

Следовательно, уравнение (8) можно представить следующим образом

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} &= -g \frac{\partial d}{\partial x} - \frac{g}{d} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\operatorname{th} md}{m} \eta \right) + g \frac{\partial d}{\partial x} + \\ &+ \frac{g\eta}{d \operatorname{ch} md} \frac{\partial d}{\partial x} = -\frac{g}{d} \cdot \\ &\cdot \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\operatorname{th} md}{m} \eta \right) - \frac{\eta}{\operatorname{ch} md} \frac{\partial d}{\partial x} \right] = -\frac{c^2}{d} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \\ &- \frac{\eta k^2}{d} \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{m^2} + \frac{g\eta}{d \operatorname{ch} md} \frac{\partial d}{\partial x} = -\frac{c^2}{d} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \\ &+ \frac{2\eta k^2}{dm^3} \frac{\partial m}{\partial x} + \frac{g\eta}{d \operatorname{ch} md} \frac{\partial d}{\partial x} \end{aligned} \quad (11)$$

где  $c$  - фазовая скорость волн.

Продифференцируем уравнение (6) по  $x$

$$\frac{\partial m}{\partial x} = \frac{k^2}{g} \frac{\partial}{\partial x} cthmd = -\frac{k^2}{gsh^2md} \left( m \frac{\partial d}{\partial x} + d \frac{\partial m}{\partial x} \right).$$

Или

$$\begin{aligned} \frac{\partial m}{\partial x} &= -\frac{k^2 m}{gsh^2md \left( 1 + \frac{k^2 d}{gsh^2md} \right)} \frac{\partial d}{\partial x} = \\ &= -\frac{km}{c_g sh2md} \frac{\partial d}{\partial x} \end{aligned} \quad , (12)$$

где  $c_g$  - групповая скорость.

С учетом (12) уравнение (11) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{c^2}{d} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{2\eta k^2}{dm^3} \frac{km}{c_g sh2md} \frac{\partial d}{\partial x} - \\ - \frac{g\eta}{dchmd} \frac{\partial d}{\partial x} = 0 \end{aligned}$$

После преобразований получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{c^2}{d} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{2kc(c - c_g chmd)}{dc_g sh2md} \cdot \\ \cdot \eta \frac{\partial d}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad .(13)$$

Соответственно после интегрирования по глубине уравнения (3) получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{c^2}{d} \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{2kc(c - c_g chmd)}{dc_g sh2md} \cdot \\ \cdot \eta \frac{\partial d}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad .(14)$$

Таким образом система уравнений, позволяющая описывать трансформацию волн на произвольной глубине с учетом ди-

фракции и рефракции, в том числе с учетом влияния каньонов, имеет вид [2]

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} d \cdot U + \frac{\partial}{\partial y} d \cdot V = 0, \quad (7^*)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{c^2}{d} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{2kc(c - c_g chmd)}{dc_g sh2md} \cdot \\ \cdot \eta \frac{\partial d}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad .(13^*)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{c^2}{d} \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{2kc(c - c_g chmd)}{dc_g sh2md} \cdot \\ \cdot \eta \frac{\partial d}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad .(14^*)$$

Для решения этой системы уравнений необходимо задать начальные и граничные условия. Если расчетная область имеет вид прямоугольника с непроницаемыми боковыми стенками и береговой границей, то эти условия можно задать в виде

$$\begin{aligned} \text{при } t = 0: \quad U = V = 0, \quad \eta = 0; \\ \text{при } x = 0, x = M: \quad U = 0, \quad \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0; \quad (15) \\ \text{при } y = 0: \quad U = 0, \quad \eta = a_0 \sin kt; \\ \text{при } y = N: \quad \partial U / \partial x = 0, \quad V = 0. \end{aligned}$$

Здесь  $x = 0$  и  $x = M$  – соответственно левая и правая границы расчетной области;  $y = 0$  – входной створ;  $y = N$  – береговая граница;  $a_0$  – амплитуда волн;  $k = 2\pi/T$  - круговая частота;  $T$  – период волн.

Принято, что входной створ удален от сооружений на такое расстояние, что за расчетное время отраженные волны не доходят до него. На урезе воды задано условие непротекания. Гидравлическое сопротивление может быть учтено путем введения в уравнения (13), (14) соответственно дополнительных членов  $\mu U/d$  и  $\mu V/d$ , где  $\mu(x, y)$  - линеаризованный (размерный) коэффициент сопротивления.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты трансформации волн при их распространении с глубокой воды до прибрежной зоны в приведенной постановке выполнены для четырех направлений волнения: юго-западного; южного; западного; юго-восточного.

Параметры волн на глубокой воде расчетных штормов повторяемостью 1 раз в 50 лет, полученные в результате расчета по нормативной методике [3]–[5] с учетом последних справочных данных по ветру и волнению [6], представлены в таблице.

*Таблица. Параметры волн на глубокой воде расчетных штормов повторяемостью 1 раз в 50 лет*

Румбы	ЮВ	Ю	ЮЗ	З
$\bar{h}$ , м	2,58	3,20	4,60	4,50
$\bar{T}$ , с	7,8	8,5	10,2	10,2

В этой таблице  $\bar{h}$ , средняя высота,  $\bar{T}$ , средний период волн.

План расчетной области и рельеф дна для участка ПК15-ПК35 при описании трансформации волн юго-западного румба показаны на рисунках 1 и 2. На рисунке 2 для наглядности масштабы искажены: вертикальный масштаб в 10 раз крупнее планового. На левой границе участка «построены» восточный мол и оконечность юго-западного мола морского порта Сочи - Имеретинский.

Результаты расчетов волнового поля при юго-западном шторме повторяемостью 1 раз в 50 лет иллюстрируются на рисунках 3 - 4. Светлым пунктиром на рисунке 4 показана десятиметровая изобата. Темные полосы соответствуют гребням волн, а светлые впадинам. Можно видеть, что при распространении волн над неоднородным рельефом дна происходит их существенная трансформация. Изменяются длина, высота и направление волн. Кроме того, в определенных зонах наблюдается концен-

трация энергии волн. Изолинии средних высот волн при юго-западном шторме показаны на рисунке 5. На этих рисунках рост высоты волн в зонах концентрации волновой энергии ограничен глубиной. Принято, что высота волн не может быть больше, чем 0,73 от глубины.

Кроме представленных результатов в работе получены также расчетные данные о трансформации волн на подводном береговом склоне при штормах Ю, З и ЮВ румбов. Для иллюстрации на рисунках 6 и 7 приведены волновые поля в акватории при штормах редкой повторяемости южного и западного румбов.

## 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интенсивность и направленность береговых процессов в значительной степени определяется параметрами волн в прибрежной зоне моря. Из полученных результатов следует, что неоднородный рельеф дна и подводные каньоны оказывают существенное влияние на высоту и направление волн в прибрежной зоне моря. Так на участке между пикетами ПК20-ПК22, ПК25-ПК29, ПК32-ПК34 практически при всех направлениях волнения происходит концентрация волновой энергии. Увеличение высоты волн будет и вблизи восточного мола морского порта при штормах южного и юго-западного румбов. При одном и том же шторме высота волн на одной и той же глубине в различных точках прибрежной зоны может отличаться в 2÷3 раза, а направление на  $40^0 \div 60^0$ .

Необходимо отметить также особенности трансформации волн между пикетами ПК19-ПК21 и ПК22-ПК25 при юго-западном направлении волнения. При данном волнении на этих участках углы подхода волн к линии берега противоположны по знаку, что при определенных условиях может привести к формированию встречных потоков наносов и безвозвратному выносу пляжевого материала на глубину.

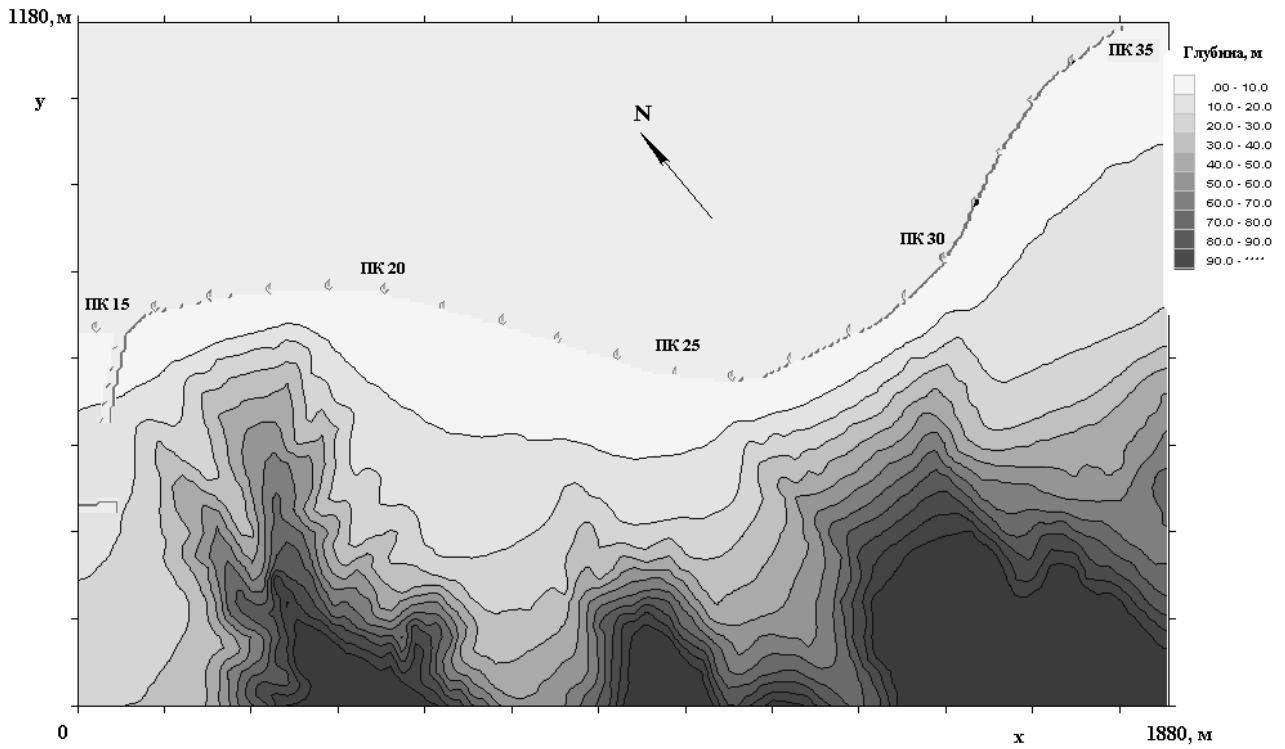


Рис. 1. План расчетной области

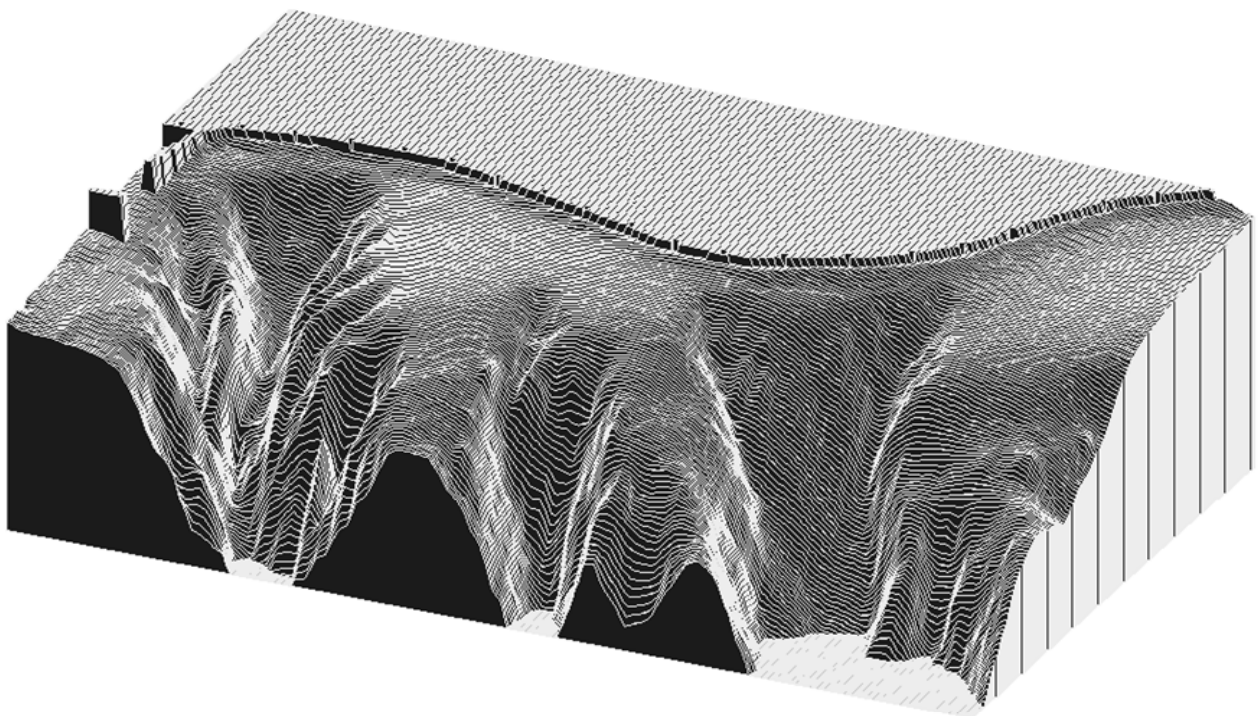
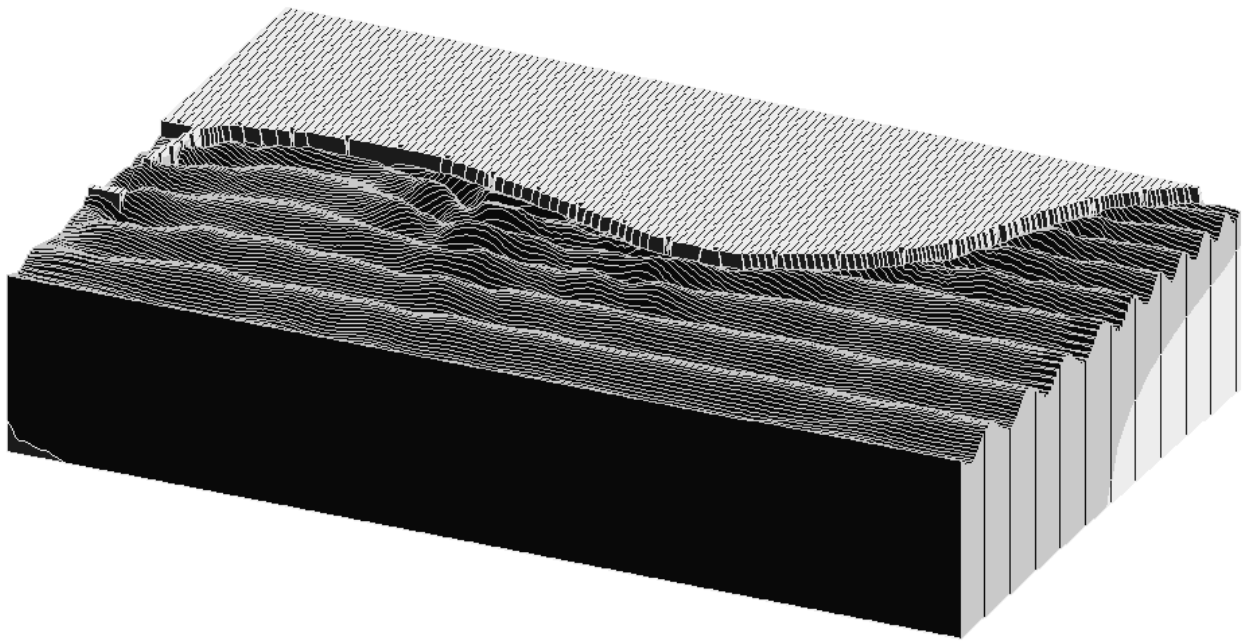
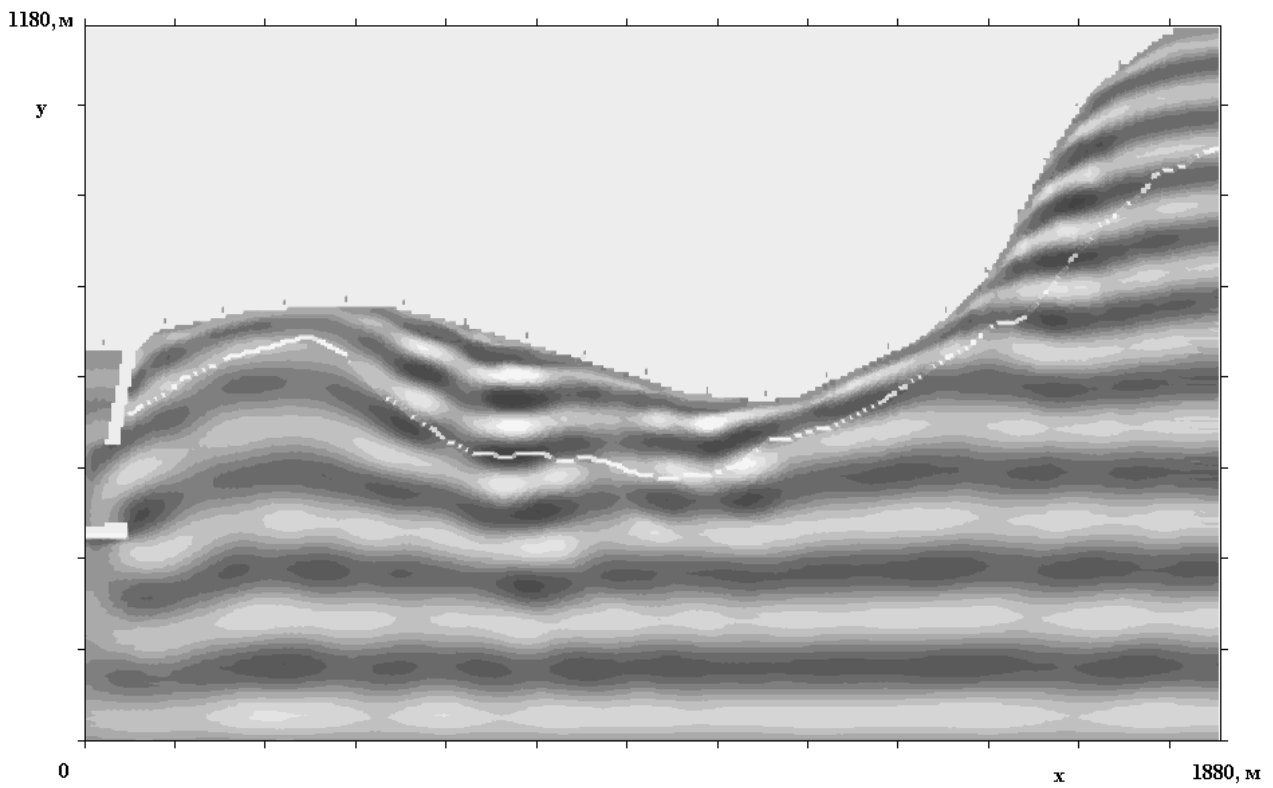


Рис. 2 Рельеф подводного берегового склона



*Рис. 3. Вид взволнованной поверхности – юго-западный шторм повторяемостью 1 раз в 50 лет*



*Рис. 4. Плановая картина волн – юго-западный шторм повторяемостью 1 раз в 50 лет*

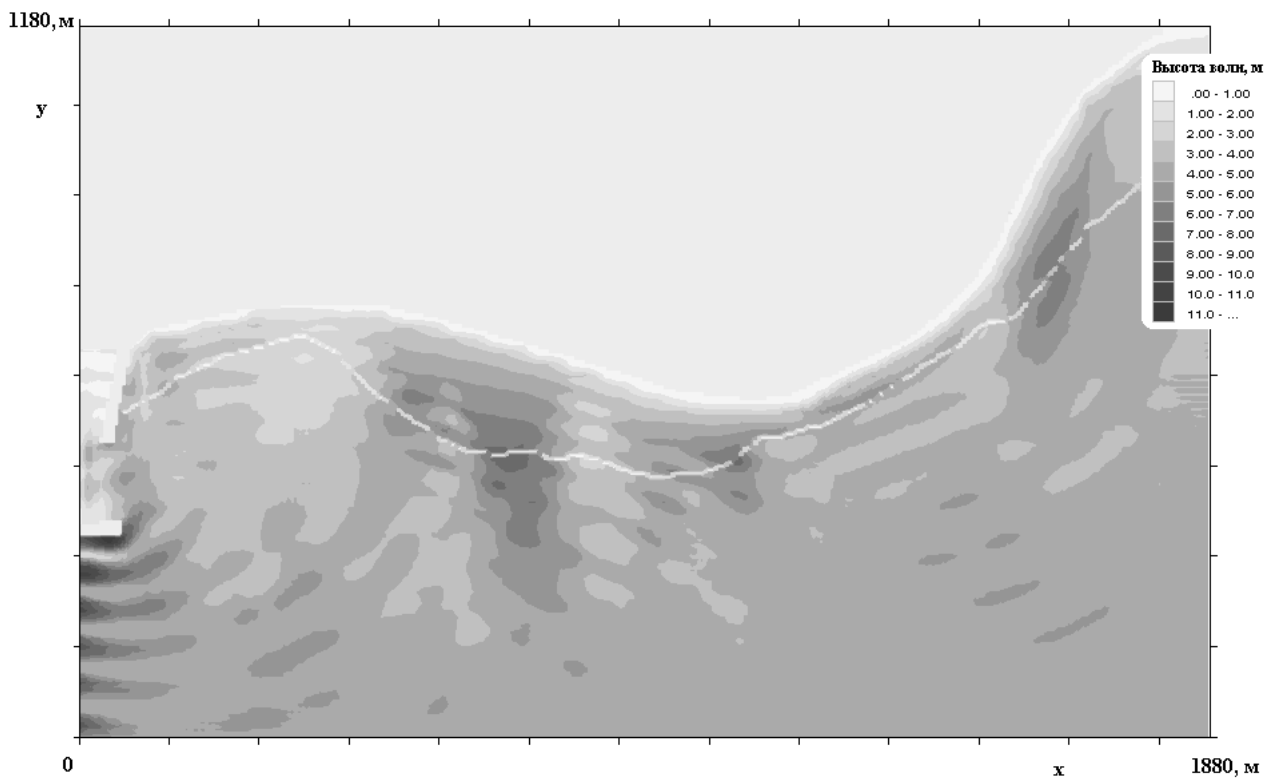


Рис. 5. Изолинии высот волн – юго-западный шторм повторяемостью 1 раз в 50 лет

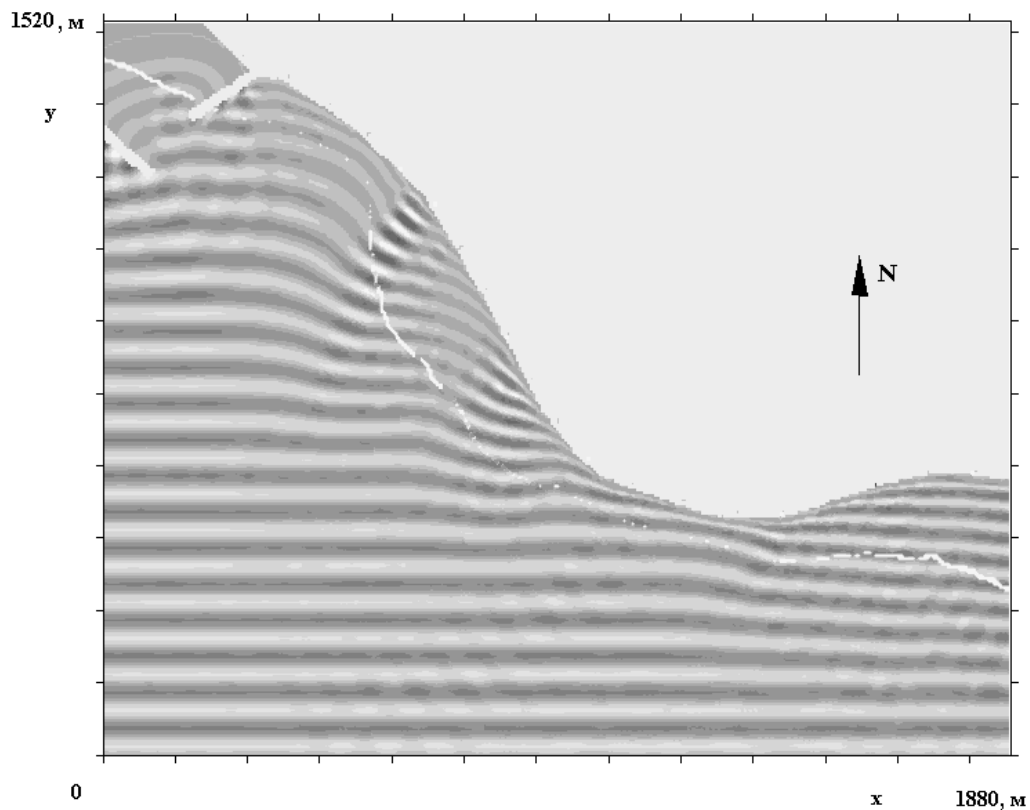


Рис. 6. Плановая картина волн – южный шторм повторяемостью 1 раз в 50 лет

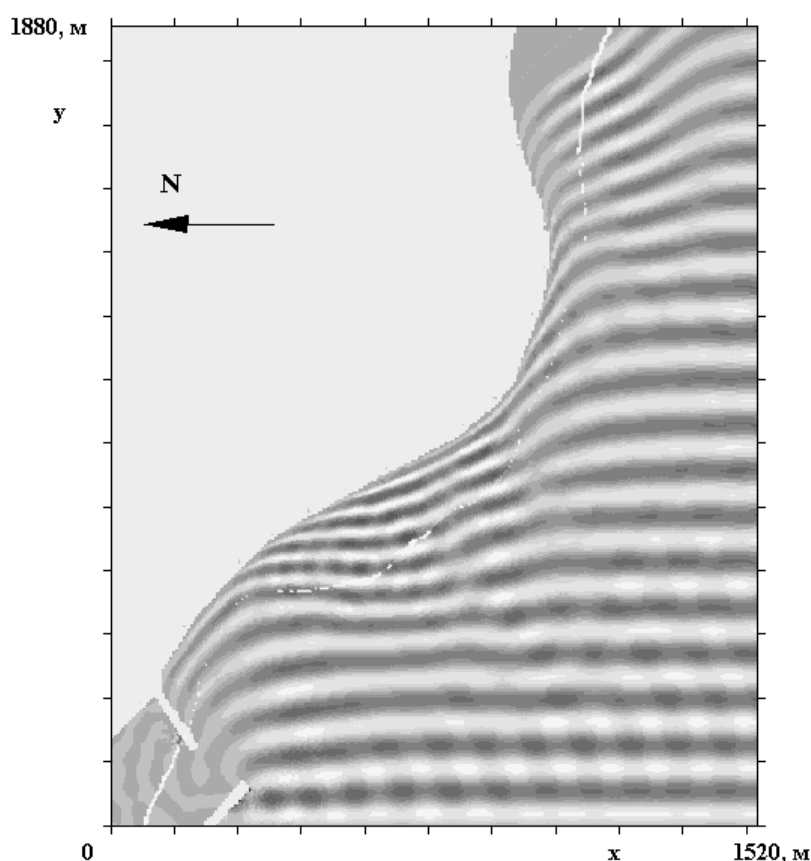


Рис. Плановая картина волн – западный шторм повторяемостью 1 раз в 50 лет

На основании полученных результатов исследований можно рекомендовать:

- берегозащитные сооружения проектировать на различное волновое воздействие вдоль берега;
- разработать сооружения, препятствующие выносу пляжевого материала в подводные каньоны на участках возможного встречного движения наносов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1970. – 904 с.
2. Шахин В.М., Шахина Т.В. Метод расчета дифракции и рефракции волн. // Океанология, 2001, т.41, № 5, с. 674-679.
3. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей. С-П. 2006 г. 450 с.
4. СНиП 2.06.04-82\* Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М. 1989. 41 с.
5. Лаппо Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения. – Л.: 1990. – 432 с.
6. Р 31.3.07-01. Указания по расчету нагрузок и воздействий от волн, судов и льда на морские гидротехнические сооружения. – М. 2001 – 75 с.

---

Шахин Виктор Миронович, доктор технических наук, заместитель директора ООО “Гидротехника”, 354002, г. Сочи, Фабрициуса 2/9, e-mail: TVShakhi-na@yandex.ru

Математическое моделирование трансформации волн расчетных штормов с учетом влияния подводных каньонов

Шахина Татьяна Викторовна, научный сотрудник,  
Учреждение Российской академии наук Государственный южный научно-исследовательский полигон РАН, (ГНИП РАН), лаборатория «Геофизических и волновых процессов», 354000, г. Сочи, ул. Театральная, 8а, e-mail: TVShakhina@yandex.ru

Victor. M. Shakhin, “Hidrotechnika” LLC, 354002,  
Sochi, Fabritciusa st., 2/9,  
e-mail: TVShakhina@yandex.ru

Tatiana. V. Shakhina, State Southern Research Testing  
Ground of Russian Academy of Sciences, Laboratory  
of “Geophysical and Wave processes” 354000, Sochi,  
Teatralnaja st., 8a, e-mail: TVShakhina@yandex.ru

## ДИНАМИКА БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ИМЕРЕТИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

*Н.А. Ярославцев, В.А. Петров, А.П. Кириленко*

Филиал ОАО ЦНИИС «НИЦ «Морские берега», г. Сочи, РОССИЯ

**АННОТАЦИЯ:** В данной статье рассмотрен вопрос о морфологии берегового склона и влиянии на нее подводных каньонов. При исследовании использовались результаты анализа картографического материала по Имеретинской бухте (Сочи, Россия) за период с 1838-2010 г. Результаты работы могут найти практическое применение при проектировании гидротехнических сооружений, а также при геоморфологических исследованиях прибрежной зоны.

**Ключевые слова:** пляж, береговая линия, размыв пляжа, аккумуляция наносов, вдольбереговой поток наносов, подводный склон, каньон.

## DYNAMIC OF THE COASTAL ZONE OF IMERETINSKAYA LOWLAND

*Nestifor A. Yaroslavtsev, Victor A. Petrov, Kirilenko A.P.*

Russia Branch of Scientific Centre "Sea Coasts", Sochi, RUSSIA

**ABSTRACT:** The object of this paper is the problem of the submarine canyons and their influence on the coastal morphology. The approach uses the results of analysis of cartographical materials for the Imeretinskaya Bay (Sochi, Russia) during the period of 1838-2010. The work's results will have practical application as at the designing coastal structures, as at the coastal geomorphology researching.

**Key words:** beach, coastline, beach erosion, accumulation of sediment, sediment flow, underwater slope, canyon.

Имеретинская низменность, в пределах которой возводятся часть спортивных объектов Зимней олимпиады, расположена между устьями рек Мзымта и Псоу на территории Адлерского района г.Сочи. Береговая линия, окаймляющая низменность, протяженностью 7,8 км имеет сложные очертания с чередованием небольших мысов, таких как «Константиновский», и слабоврезанных бухт (рисунок 1).

Основной особенностью рассматриваемого участка берега является его приглубость и наличие каньонов, таких как «Приустьевой», приуроченный к устью р.Мзымта, «Новый», «Константиновский», «Восточный». Здесь практически нет шельфа. Бровка континентального склона в верховьях каньонов приближена к берегу на 70-100 м, а между ними - на 200-250 м. Характерно и гипсометрическое положение бровки континентального склона.

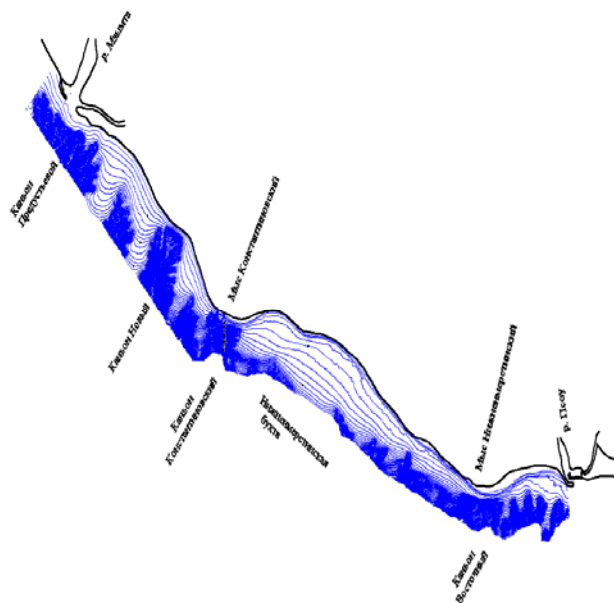


Рис. 1. Схема рассматриваемого участка берега

Если на участке берега от Новороссийска до Сочи бровка континентального склона располагается на глубине, в среднем, около 100 м и удалена от берега на 7-9 километров, то в районе Адлера она располагается на глубине 20-40 м, а в верховьях каньонов – на глубине 10-12 м. Четко проявляется закономерность: чем уже шельфовая терраса, тем меньше глубина на бровке континентального склона. На рассматриваемом участке берега континентальный склон крутой. Его уклоны изменяются от 0,25 до 0,28. Следует подчеркнуть, что такие уклоны континентального склона характерны для всего берега от Сочи до Новороссийска, где распространен широкий шельф и поэтому Адлерский участок не отличается от соседнего.

Приглубость обуславливает подход непосредственно к береговой зоне мало трансформированных волн «глубокого» моря и высокую интенсивность гидролитодинамических процессов, протекающих в ней. Конфигурация берега, рельеф подводного склона и наличие каньонов определяют сложную картину волнового поля. Параметры волн (высота и угол их подхода) существенно варьируют вдоль берега при каждом конкретном шторме, что обуславливает разную интенсивность их воздействия на берег и пляж, а в отдельных случаях и противоположную направленность вдольберегового переноса пляжевого материала. Поэтому последствия каждого шторма для отдельных фрагментов берега в зависимости от ориентировки береговой линии и особенностей подводного рельефа будут существенно отличаться.

В развитии береговых процессов, протекающих на рассматриваемом участке целесообразно выделить три этапа. До пятидесятих годов прошлого столетия длился первый этап, когда берег находился в естественном состоянии, и его динамика определялась, в основном, бюджетом пляжеобразующего материала, поставляемого на берег реками, его перемещением волнами вдоль берега, истиранием и потерями в зоне каньонов.

Материалов, характеризующих состояние берега Имеретинской низменности в течение первого этапа крайне мало. Общие представления о морфологии берега и тенденции его развития можно получить, используя топографические материалы прошлых лет. Первая съемка берега от устья Мзымты до мыса Константиновский с промером глубин на Адлерском рейде выполнена в 1838 г. поручиком Радионовым. В 1886 году выполнена съемка берега всей Имеретинской низменности от Псоу до Мзымты и двухкилометровая полоса берега к северу от устья последней с промером глубин Адлерского рейда. Сопоставление планового положения береговой линии междуречья Мзымта-Псоу 1886 и 1975 годов свидетельствует о повсеместном отступании берега, за исключением устья р. Мзымта, положение которого практически не изменилось. Минимальные смещения произошли также с восточных сторон мысов, расположенных на флангах Имеретинской бухты [1,2].

Анализируя картографический материал, прошлых лет В.М.Пешков пришел к выводу, что в естественном состоянии берег междуречья нарастал со средней скоростью около 0,1 м/год [3].

Второй этап, начиная с конца пятидесятих годов прошлого столетия и до 2010 года, характеризуется массовой выборкой материала в Имеретинской низменности сначала с пляжей и древних береговых валов, а затем из русел рек Мзымта и Псоу, а также строительством берегозащитных и пляжеудерживающих сооружений в пределах рассматриваемого участка и к северу от устья Мзымты. Последние перехватили вдольбереговой поток галечного материала, подходящий с севера к устью Мзымты.

Третий этап начался с 2010 года, когда возведенные оградительные молы нового порта, размещенного южнее устья р.Мзымты начали оказывать влияние на динамику пляжа, расположенного ниже по ходу вдольберегового потока галечного материала, обеспечивающего в прошлом относительно ста-

бильность берега Имеретинской низменности.

И.П.Балабановым [4] на основе материалов наблюдений за шириной пляжа на 70 стационарных створах за 1975-1990 и 2000-2009 годы дана оценка динамики берега Имеретинской низменности в современных условиях. Материалы выполненных режимных наблюдений свидетельствуют о том, что направленность и интенсивность приращения ширины пляжа существенно изменяются вдоль берега в зависимости от ориентировки береговой линии, а также во времени. Согласно [4] в целом для всего междуречья Мзымта-Псоу средняя ширина пляжа за 1975-2000 годы выросла на 5 м, а в течение 2000-2009 годов она практически не изменилась. На участке от устья Мзымты до мыса Константиновский средняя ширина пляжа уменьшилась на 5 м, а на участке от м. Константиновский до устья Псоу выросла на 13 м.

Эти результаты представляют большой практический интерес в связи с проектированием берегозащиты Имеретинской низменности. Следует, однако, отметить, что характеристика «ширина пляжа» (расстояние от уреза моря до подошвы абразионного уступа или до гребня штормового вала) – не в полной мере отражает тенденцию развития берега.

В период с 1975 по 2010 годы Научно-исследовательским центром «Морские берега» в рамках подготовки рекомендаций для проектов берегоукрепления выполнены топо-батиметрические съемки, как отдельных фрагментов берега Имеретинской низменности, так и всего участка в целом. Всего за указанный период было выполнено 6 съемок отдельных фрагментов берега и две, охватывающие всю береговую полосу междуречья. Первая съемка от устья р.Псоу до устья р.Мзымта была выполнена в 1975 г. Вторая – от устья Псоу до восточного мола строящегося порта протяженностью 6,2 км - в 2010 г. Анализ полученных материалов позволяет дать оценку общей направленности современным береговым процессам по контуру Имеретинской низменности, её особенно-

стям на отдельных фрагментах берега, динамики профиля пляжа, а также определить объемы деформаций пляжа и подводного склона до глубины 20 м.

За основной показатель динамики берега приняты смещения положений линии уреза моря, а также соответствующих изобат на подводном склоне, полученные по материалам топо-батиметрических съемок за 1975, 2007 и 2010 годы по профилям, расположенным через каждые 100 м на участке берега между устьями рек Мзымта и Псоу. Анализ этих смещений показал, что в целом для всего участка отчетливо выражена тенденция нарастания ширины пляжа, при этом линия уреза с 1975 по 2010 годы выдвинулась в море на 2,8 м, а средняя скорость выдвигания составила 0,1 м/год. Распределение фактических смещений по длине рассматриваемого участка берега оказалась сложным, что видно из данных таблицы 1, в которой значения со знаком минус соответствуют смещениям в сторону берега, т. е. произошел размыв, а со знаком плюс – выдвигание в сторону моря. Динамика пляжа и подводного склона на каждом фрагменте берега может быть выявлена по материалам режимных наблюдений. В связи с разной направленностью береговых процессов целесообразно рассмотреть их по отдельным участкам берега.

На участке берега между устьем р. Мзымта и каньоном «Новый» протяженностью 1,6 км до 1975 года наблюдался размыв пляжа, обусловленный массовыми изъятиями руслового аллювия. Размыв пляжа и берега вызвал необходимость проведения берегоукрепительных мероприятий, которые оказались малоэффективными.

С 1975 по 1990 годы на протяжении первых пятисот метров произошло расширение пляжа и выдвигание берега в море. Максимальное выдвигание составило 85 м, а среднее 55 м [1]. Материалы топо-батиметрических съёмок свидетельствуют о том, что за период с 1975 по 1990 годы расширение пляжа произошло не только с южной стороны, но и на протяжении 0,6 км к северу от устья р. Мзымта.

Таблица 1. Смещение линии уреза моря и изобат на участке берега от каньона «Новый» до устья р.Псоу за 1975-2010 годы

№ профиля	Смещение, м		
	Урез	Изобата 10 м	Изобата 20 м
1	-80	-30	-20
2	-55	-30	40
4	-10	-35	55
5	-20	-12	0
6	-35	-30	-45
7	-45	-35	0
8	-40	-25	-20
9	-40	-25	-75
10	-35	-20	0
11	-20	-25	30
12	-15	15	20
13	-5	15	
14	0	0	
15	5	-20	0
16	10	-5	0
17	10	0	0
18	5	-15	0
19	-5	-12	0
20	-10	-12	-10
21	-12	-5	-10
33	20	0	15
34	18	20	30
35	15	10	30
36	10	-10	20
37	5	10	
38	0	10	
39	10	-8	15
40	10	18	-15
41	10	-10	5
42	0	10	
43	0	30	
44	0	15	10
45	10	15	0
46	15	5	20
47	15	5	55
48	20	0	50
49	10	0	25
50	12	-8	5
51	20	0	30
52	18	20	0

Несмотря на то, что с 1990 по 2007 годы на пятисотметровом участке берега расположенном южнее устья был отмечен размыв пляжа, с северной стороны продолжалось его выдвигание. Берег южнее устья за это время отступил, в среднем, на 15-16 м. Таким образом, в итоге за 32 года берег на протяжении пятисот метров от устья реки выдвинулся в море около 40 м, а средняя скорость выдвигания составила 1,2 м/год. Расширение пляжа и выдвигание берега в море вблизи устья Мзымта в 1976-1986 гг., по мнению Пешкова В.М. [3], обусловлено строительством бун ниже по потоку наносов. Буны спровоцировали усиление размыва пляжа вблизи каньона «Новый» и далее до мыса Константиновский. Потери пляжевого материала в каньон «Новый», по мнению автора, могут достигать 30 тыс. м<sup>3</sup> за один шторм. Общий размыв берега на этом участке обусловлен массовыми изъятиями гальки с пляжей и из русла р.Мзымта, а также уходом её в каньоны во время штормов.

Далее на восток до вершины каньона «Новый» на протяжении около 1 км берег подвергался размыву и отступил, в среднем, на 39 м. Фрагмент берега между каньоном «Новый» и мысом «Константиновский», протяженностью 2,2 км за это время был также подвержен размыву. Береговая линия здесь отступила на 23 м, при этом средняя скорость отступления составила 0,7 м/год, а максимальная вблизи верховья каньона «Новый» - около 2,3 м/год. Размыву подвергся не только пляж, но и подводный склон до глубины 10-15 м.

На мысе «Константиновский» береговая линия практически не изменилась. В зоне каньона Константиновского изменения профиля пляжа и подводного склона за тот же период существенно отличались от рассмотренного выше. Надводный пляж здесь практически не изменился. Было размыто только основание береговой дамбы. Линия уреза за 35 лет выдвинулась в море всего на 5 м (рисунки 2).

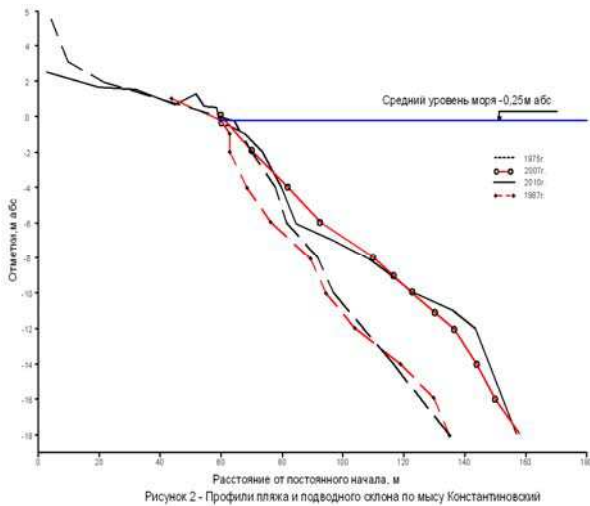


Рис. 2. Профили пляжа и подводного склона по мысу Константиновский

Тем не менее, в динамике рельефа подводной части наблюдались существенные изменения. Если подводная часть профиля в период с 1975 по 1987 год изменилась незначительно, отмечено лишь отложение галечного материала на глубинах до 8 м, то за период с 1987 по 2007 годы произошло существенное накопление материала на глубинах до 18 м и более. В течение 2007- 2010 годов подводная часть профиля практически не изменилась. Следует отметить, что по свидетельству В.П.Зенковича [5], погружавшегося в этот каньон на исследовательском аппарате в 1975 г., галечный материал на дне Константиновского каньона был прослежен до глубины 220 м.

С восточной стороны Константиновского мыса берег на протяжении 500 м выдвинулся, в среднем, на 7,5 м. На протяжении следующих четырехстах метрах, т.е. на участке берега, расположенном на западном крыле Имеретинской бухты берег отступил, в среднем, на 9,8 м. Далее на восток до устья Псоу отмечается устойчиво выдержанное по длине выдвижение берега, за исключением мыса Нижнеимеретинского, замыкающего с востока одноименную бухту. На мысе положение береговой линии на протяжении 350 м за 35 лет не изменилось. В среднем, на этом участке берег выдвинулся на 13 м. Отмечен-

ные выше изменения береговой линии, в целом, согласуются с результатами, полученными в работе [4] по материалам режимных наблюдений за шириной пляжа. Они отражают конечный результат изменений за 35 лет и позволяют оценить общую тенденцию развития берега. На рисунке 3 представлена динамика профиля пляжа, включая его подводную часть на створе, расположенном в 0,6 км к востоку от Константиновского мыса, из которого следует, что в 1975 году пляжевая полоса здесь была минимальна. Подошва пляжа располагалась на глубине 4-5 м. К январю 1988 г. берег выдвинулся в море на 35 м, причем подводная граница галечного пляжа расположилась на глубине 7 м. После прохождения ряда зимних штормов пляж был размыв и урез сместился к берегу на 13 м. К июлю 2010 г. профиль пляжа практически вернулся в положение 1975 г.

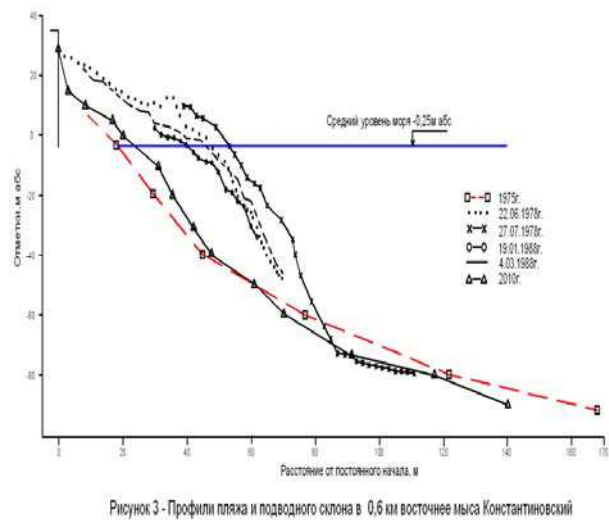


Рисунок 3 - Профили пляжа и подводного склона в 0,6 км восточнее мыса Константиновский

Рис. 3 Профили пляжа и подводного склона в 0,6 км восточнее мыса Константиновский

Следует подчеркнуть, что отмеченные изменения размеров пляжа и его профиля не связаны с дефицитом пляжевого материала в потоке наносов, что характерно для берега к западу от мыса Константиновского. Поток наносов здесь за весь рассматриваемый период был насыщенным, поскольку выше по потоку располагался галечный пляж, протя-

женность была 1,5 км. Флуктуации пляжа на рассматриваемом фрагменте берега обусловлены закономерностями вдольберегового перемещения материала, которые в свою очередь, связаны с волновым режимом.

Из рисунка 3 также следует, что на данном фрагменте берега подводная часть профиля галечного пляжа смещается параллельно при размыве или выдвигении пляжа в море. Об этом же свидетельствуют данные таблицы 1, из которых видно, что изобата 10 м, как правило, смещается синхронно с линией уреза. Это характерно для фрагментов берега, где свал глубин удален от берега.

Материалы топо-батиметрических съемок отдельных фрагментов и всего участка в целом, а также исследования динамики галечных пляжей на гидравлических моделях в волновом бассейне свидетельствуют о том, что основное перемещение пляжевого материала на рассматриваемом участке берега происходит в виде распластанных, слабо выраженных в рельефе аккумулятивных форм, которые медленно смещаются по потоку наносов, направленному от устья р.Мзымта в сторону р.Псоу. Прохождение таких форм вызывает периодические смещения линии уреза с амплитудой до 30 м и более. Эти колебания накладываются на общий фон (тенденцию) развития берега, обусловленный подъемом уровня моря, дефицитом пляжеобразующего материала и другими факторами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Петров В.А., Глявлин Р.М., Ярославцев Н.А.** Формирование контура берега в зоне подводных каньонов. // Труды. Геоморфологические процессы и их прикладные аспекты. VI Щукинские чтения. М., 2010. С. 335-337.
2. **Петров В.А., Глявлиня Г.В., Ярославцев Н.А.** Морфология галечного пляжа в зоне подводных каньонов. // Материалы XXIII Международной береговой конференции в честь столетия со дня рождения профессора В.П.Зенковича. Учение о развитии морских берегов: вековые традиции и идеи современности. Санкт-Петербург, 2010. С. 107-108.
3. **Пешков В.М.** Галечные пляжи неприливных морей. Краснодар, 2005. 444 с.
4. **Балабанов И.П.** Палеогеографические предпосылки формирования современных условий и долгосрочный прогноз развития голоценовых террас Черноморского побережья Кавказа. Дальнаука. Москва-Владивосток, 2009. 350 с.
5. **Зенкович В.П.** Подводные каньоны. Серия «Наука о Земле» № 4. Изд-во «Знание». М., 1978. 56 с.

---

Ярославцев Нестифор Аксентьевич, кандидат технических наук, Филиал ОАО ЦНИИС «Научно-исследовательский центр «Морские берега» г. Сочи (НИЦ «Морские берега»); 354002, Краснодарский край, г. Сочи, Яна Фабрициуса ул., д. 1; e-mail: demmi8@mail.ru

Петров Виктор Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Филиал ОАО ЦНИИС «Научно-исследовательский центр «Морские берега» г. Сочи (НИЦ «Морские берега»); 354002, Краснодарский край, г. Сочи, Яна Фабрициуса ул., д. 1; e-mail: demmi8@mail.ru

Кириленко А.П., Филиал ОАО ЦНИИС «Научно-исследовательский центр «Морские берега» г. Сочи (НИЦ «Морские берега»); 354002, Краснодарский край, г. Сочи, Яна Фабрициуса ул., д. 1; e-mail: demmi8@mail.ru