

### МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

### ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ АРКТИЧЕСКИЙ И АНТАРКТИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ

# ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

№ 3 (105)

Издается с июня 1937 г.

Санкт-Петербург ААНИИ 2015

д-р геогр. наук, профессор И.Е. Фролов (ААНИИ) Редакционная коллегия канд. физ.-мат. наук А.И. Данилов (зам. главного редактора) канд. геогр. наук И.В. Бузин (ученый секретарь, тел. (812) 337-3212, e-mail: buzin@aari.ru) А.А. Меркулов (секретарь, тел. (812) 337-3135, e-mail: aam@aari.ru) д-р геогр. наук Г.В. Алексеев (ААНИИ) канд. физ.-мат. наук Л.П. Бобылев (Фонд Нансен-центр) д-р геогр. наук В.С. Вуглинский (ГГИ) канд. геол.-минерал. наук Г.Э. Грикуров (ВНИИОкеангеология) д-р геол.-минерал. наук В.Л. Иванов (ВНИИОкеангеология) д-р физ.-мат. наук В.М. Катцов (ГГО) канд. геогр. наук В.Я. Липенков (ААНИИ) канд. техн. наук В.А. Лихоманов (ААНИИ) д-р физ.-мат. наук А.П. Макитас (ААНИИ) д-р геогр. наук Е.У. Миронов (ААНИИ) канд. биол. наук А.В. Неелов (ЗИН РАН) д-р геогр. наук А.Ю. Прошутинский (Woods Hole Oceanographic Institute, USA) канд. геогр. наук В.Ф. Радионов (ААНИИ) д-р философии Д. Рэйно (Centre National de la Recherche Scientifique, France) д-р физ.-мат. наук В.А. Рожков (СПбГУ) д-р геогр. наук Л.М. Саватюгин (ААНИИ) д-р техн. наук К.Г. Ставров (ОАО «ГНИНГИ») д-р физ.-мат. наук Л.А. Тимохов (ААНИИ) д-р физ.-мат. наук О.А. Трошичев (ААНИИ)

Главный редактор

### ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

#### № 3 (105)

#### Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-35144 от 28 января 2009 г.

Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций В соответствии с решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 19 февраля 2010 года № 6/6 журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписные индексы издания в каталоге «Газеты. Журналы» ОАО «Агентство Роспечать» 70279 – на год

48657 – для индивидуальных подписчиков (на полгода)

70278 – для предприятий и организаций (на полгода)

Редактор Е.В. Миненко

ISSN 0555-2648

Государственный научный центр РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ГНЦ РФ ААНИИ), 2015

# СОДЕРЖАНИЕ

<i>Е.А. Гусев.</i> Неотектонические нарушения новейшего чехла в районе Енисейского залива Карского моря	. 5
С.А. Лапин, К.В. Артамонова, И.А. Гангнус, К.К. Кивва. Гидролого-гидрохимическ структура фронтальной зоны Обской губы в раннеосенний период	сая 15
<i>Е.А. Спиридонов, О.Ю. Виноградова.</i> Анализ данных земноприливных наблюдений на японской антарктической станции Syowa	27
А.Е. Вязилова, Г.В. Алексеев, А.А. Балакин, А.В. Смирнов. Влияние Арктики на формирование аномалий солености в Северо-Западной Атлантике и Северо-Европейском бассейне	39
Г.Н. Войнов, А.А. Пискун. Оценка приливов в Новом порту (Обская губа) по наблюдениям за уровнем за период 1977–2012 гг.	51
Е.А. Зыков, Е.А. Гусев. Погребенная палеодолинная сеть Чукотского шельфа	66
И.А. Немировская, А.В. Травкина, И.П. Трубкин. Углеводороды в водах и донных осадках Белого моря	77
<i>Н.В. Кубышкин, Ю.П. Гудошников</i> . Актуализация технологий перевалки грузов через припай	90
С.В. Попов, М.П. Кашкевич. Двухпозиционные зондирования в георадиолокации: границы применимости и возможности метода	99

# СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

Л.М.Саватюгин.	Имена сотрудни	ков ААНИИ н	а географи	ических карт	ax.
Иван Федорович	Пустовалов, Вла	адимир Рудоль	фович Сам	мойлович	111

# CONTENTS

<i>E.A. Gusev.</i> Cenozoic sediment cover neotectonic deformations in the Yenisei bay area (Kara sea)
<i>S.A. Lapin, K.V. Artamonova, I. A. Gangnus, K.K. Kivva.</i> Hydrological and chemical characteristics of the frontal zone in the Obskaya guba in early autumn
<i>E.A. Spiridonov, O.Yu. Vinogradova</i> . The Analysis of the Earth Tide Observations on Japanese Antarctic Station Syowa
<i>A.E. Viazilova, G.V. Alekseev, A.A. Balakin, A.V. Smirnov.</i> Influence of the Arctic on salinity anomaly formation in the North-West Atlantic and North European basin 39
<i>G.N. Voinov, A.A. Piskun.</i> The valuation of the tides in the New Port (the Gulf of Ob) on the sea level data the span of 1977–2012 years
E.A. Zykov, E.A. Gusev. Burial paleovalleys of Chukchi shelf
<i>I.A. Nemirovskay, A.V. Travkina, I.P. Trubkin.</i> Hydrocarbons in water and bottom sediments of the White sea
<i>N.V. Kubyshkin, Yu.P. Gudoshnikov.</i> Actualization of the technologies of cargo transshipment across fast ice
S.V. Popov, M.P. Kashkevich. Two-position GPR sounding: limits and possibilities 99
PAGES OF HISTORY

*L.M.Savatyugin.* Names of AARI scientists on geographical maps. Ivan Fyodorovitch Pustovalov, Vladimir Rudolfovitch Samoylovitch......111 УДК 551.248.2

Поступила 18 июня 2015 г.

## НЕОТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАРУШЕНИЯ НОВЕЙШЕГО ЧЕХЛА В РАЙОНЕ ЕНИСЕЙСКОГО ЗАЛИВА КАРСКОГО МОРЯ

#### канд. геол.-минерал. наук Е.А. ГУСЕВ

ФГУП «ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга», Санкт-Петербург, e-mail: gusevgeny@yandex.ru

Рассмотрены широко распространенные в низовьях Енисея и по берегам Енисейского залива неотектонические деформации верхней части осадочного чехла Западно-Сибирской плиты. В основном деформации являются складками и разрывами гравитационного оползания со склонов поднятий либо на границах перемещающихся блоков фундамента, разломные границы которых обновлялись в позднем кайнозое и в четвертичное время.

*Ключевые слова:* неотектоника, четвертичные отложения, гравитационное оползание, складки, Енисейский залив.

Район исследования находится на побережье Енисейского залива Карского моря. Здесь в береговых обрывах рек, озер и морского побережья вскрываются как литифицированные коренные породы, так и вязкопластичные и рыхлые песчано-глинистые новейшие отложения. В структурно-геологическом отношении Енисейский залив совпадает с зоной сочленения Западно-Сибирской плиты и раннемезозойской складчатой области западного Таймыра. В.Н. Сакс (1945) указывал на современную тектоническую активность севера Сибири, выражающуюся вертикальными движениями противоположного знака с подъемом горных массивов Средне-Сибирского плоскогорья, и погружение впадины Северо-Сибирской низменности. Крупные неотектонические колебательные циклы выразились в Арктике образованием лестницы морских террас (Данилов, 1997). Вместе с тем Западно-Сибирская равнина «не пребывала непоколебимой глыбой» (Брагин, 2001, с. 71), а подвергалась неотектоническим деформациям. В юго-восточной части Енисейского залива складчатый фундамент перекрыт юрско-меловыми породами Енисей-Хатангского прогиба. Таймырский и южная часть гыданского берега Енисейского залива, по Е.Е. Мусатову (1996; 1999), являются тектоническими границами, разделяющими области новейших поднятий и опусканий. На водораздельных пространствах по таймырскому и гыданскому берегам развиты линейно-грядовые комплексы рельефа, образование которых связывают с неотектоническими процессами (Альтер, 1960; Андреев, 1960; Верба, 1964; Генералов, 1983; Сергиенко и Биджиев, 1983). В целом как для таймырского, так и для гыданского побережий Енисейского залива характерна субширотная ориентировка неотектонических структур (Корчуганова, 2013; Макаров, Григорьева, 2013). На такое же простирание новейших структур для центральной части Западно-Сибирской равнины указывал И.Л. Кузин (2006).

Судя по новым глубинным сейсмическим профилям, пересекающим Енисейский залив (Пронкин и др., 2012; Харахинов и др., 2013), разломы, нарушающие



Рис. 1. Схема неотектонических нарушений района Енисейского залива: *1* — выступы на дневную поверхность складчатого фундамента; *2* — глубинный разлом, по которому заложен Енисейский залив (Харахинов и др., 2013); *3* — предполагаемые неотектонические нарушения; *4* — предполагаемые локальные зоны неотектонического воздымания; *5* — точки наблюдения деформаций и объектов, упоминаемых в тексте.

осадочный чехол, не прослеживаются выше подошвы меловых пород. Вместе с тем низкая разрешающая способность метода отраженных волн не позволяет фиксировать разломы с незначительной вертикальной амплитудой смещения и мелкие складчатые нарушения. В пределах акватории такие нарушения могут быть выявлены только при сейсмоакустическом профилировании. На западном (гыданском) берегу и островах Енисейского залива обнажения коренных пород неизвестны, все они развиты на восточном (таймырском) побережье. Коренные породы представлены образованиями осадочного чехла — верхнемеловыми песчаниками и алевролитами (урочище Красный Яр и район поселка Воронцово), а также выступами складчатого раннемезозойского фундамента — вулканогенно-осадочными комплексами карбона, перми и триаса (побережье Таймыра севернее Корсаковских островов).

Взбросовые нарушения, затрагивающие меловые породы, известны в обнажении Красный Яр (№ 5 на рис. 1 и рис. 2*г*). Складчатые деформации туронских песков и галечников с прослоями песчаников отмечаются в окрестностях пос. Воронцово (№ 4



Рис. 2. Примеры неотектонических дислокаций верхней части осадочного чехла района Енисейского залива: *а* — мыс Лескино, *б* — мыс Зверевский, *в* — у пос. Воронцово, *г* — урочище Красный Яр, *д* — таймырский берег к северу от Сопочной Карги, *е* — мыс Макаревича.

на рис. 1 и рис. 2*в*). Эти дислокации затрагивают также залегающие выше эоплейстоценовые отложения, содержащие раковины стратиграфически значимого вида *Cirtodaria jennisea* и датированные Sr-хемостратиграфическим методом (Крылов и др., 2014). Наблюдающиеся здесь деформации С.Л. Троицкий (Троицкий, 1975; Троицкий, Шумилова, 1974) считал гляциодислокациями, однако ни вергентность складок, ни падение и простирание разрывных нарушений не обнаруживают свидетельств однонаправленного горизонтального воздействия, которое можно было бы ожидать при давлении ледникового потока. Деформации зональны, приурочены к линеаментам, ассоциирующимся с разрывами, рассекающими верхнюю часть осадочного чехла. Похожие дислокации описаны в междуречье Енисея и Пясины, где деформированы верхнемеловые породы. При этом характер деформаций, описанных и зарисованных как в отчетных материалах, так и в статье (Бейзель, 1990), не убеждает в ледниковой природе этих складок и разрывов. Описанные дислокации находятся в составе Янгодской гряды, приуроченной в свою очередь к антиклинальной структуре — Рассохинскому мегавалу, протягивающемуся более чем на 300 км. Новые сейсмические данные свидетельствуют об увеличении амплитуд деформаций с глубиной в районе Рассохинского мегавала (Мунасыпов, 2013), что исключает экзогенное происхождение дислокаций. Активные неотектонические движения в пределах Таймыра выявлены геоморфологическими методами (Рогожин, 1970; Федоров и др., 2001; Большиянов, 2006).

Положение кровли коренных пород испытывает значительные колебания. В местах их выхода на дневную поверхность либо близкого к поверхности залегания, в поле силы тяжести наблюдаются значительные положительные аномалии. Часть аномалий приурочена к контрастным положительным формам рельефа. К числу таких форм на юго-восточном побережье Енисейского залива относятся довольно высокие возвышенности мыса Шайтанский (90 м над уровнем моря (н.у.м.)) и сопки, на которой находится маяк Сопочная Карга (34 м н.у.м.). О продолжающемся воздымании этих возвышенностей свидетельствует их яркая выраженность в виде выдающихся в море мысов и полуостровов, отклоняющих потоки морских течений и сток Енисея. В современных пляжевых отложениях таких мысов встречается большое количество крупнообломочного материала: гальки, валунов, глыб, представленных в основном траппами, реже — меловыми песчаниками. При этом локальных деформаций новейшего чехла непосредственно на мысах не отмечено.

Деформации наблюдаются также и в районах, где коренные литифицированные породы не обнажаются. К таким относится гыданское побережье Енисейского залива. Крупная пологая куполовидная складка и редкие приразломные дислокации на участ-ке побережья между устьями рек Монгоче-Яха и Омулевая описаны по результатам экспедиции «Ямал-Арктика-2012» (№ 1 на рис. 1) (Баранская и др., 2013). Углы на-клона ритмичнослоистых алевритов на крыльях этой структуры обычно составляют первые градусы, лишь вблизи редких разрывных нарушений наблюдаются крутые углы наклона, вплоть до субвертикальных. Далее, к юго-востоку, крутые береговые обрывы сменяются прибрежными лайдами.

Далее к юго-востоку от устья р. Нярмхой-Яха на гыданском берегу находятся знаменитые Лескинские Яры (№ 2 на рис. 1 и на рис. 2*a*), в которых протяженность субвертикальных береговых клифов высотой от 10 до 50 м составляет около 12 км. Лескинские ритмичные алевриты, слагающие яры, детально изучались с применением палеомагнитного, карпологического, спорово-пыльцевого и других методов (Каплянская и др., 1986). Сотрудники ВСЕГЕИ, изучавшие эти отложения, отнесли их к эоплейстоцену по данным карпологических исследований. Яркой особенностью лескинских алевритов является их сильная дислоцированность. Складки, наблюдающиеся в обрывах, обычно прямые, открытые, с углами падения крыльев 20–45°. Судя по резко наклонному коренному залеганию алевритов в бечевнике, у подножия яров, деформации затрагивают разрез и ниже уровня моря.

Ф.А. Каплянская и В.Д. Тарноградский (1986), изучавшие лескинские дислокации, предполагали их ледниковую природу. Однако характер складчатых и разрывных деформаций не позволяет отнести их ни к складкам перед фронтом ледника, ни к деформациям выдавливания, вызванным ледниковой нагрузкой. Оси складок ориентированы либо субвертикально, либо под углом к горизонту, при этом всегда разнонаправленно, что характеризует обычно деформации нелитифицированных пород при блоковых движениях (Паталаха, 1985).

Крупные складки с наклонными к горизонту осями, вплоть до лежачих, нарушающие четвертичные толщи, зафиксированы на западном берегу Енисейского залива к югу от мыса Зверевский ( $\mathbb{N}$  3 на рис. 1 и на рис. 2 $\delta$ ), на восточном берегу к северу от Сопочной Карги ( $\mathbb{N}$  7 на рис. 1 и на рис. 2 $\delta$ ) и у мыса Макаревича ( $\mathbb{N}$  10 на рис. 1 и на рис. 2e). Эти нарушения вызваны оползанием и смятием водонасыщенных вязкопластичных четвертичных толщ со склонов локальных зон неотектонического воздымания. Подчас трудно определить висячее и лежачее крылья складок, например, у мыса Зверевский. Однако в некоторых случаях это удается сделать, например, для складок на восточном берегу залива у мысов Макаревича и Сопочная Карга. При этом оси складок наклонены в северном направлении (см. рис. 2 $\partial$ , e), что не позволяет считать их гляциодислокациями предполагаемого Карского ледникового щита, якобы надвигавшегося с севера.

Побережье Енисейского залива относится к области сплошного распространения вечной мерзлоты (Баулин и др., 1967). Изучены подземные льды различных генетических типов, вскрывающиеся в обнажениях на побережье Карского моря (Шило, Данилов, 1984; Карпов, 1986; Усов, 1967; Кизяков и др., 2006; Стрелецкая и др., 2007; 2012; 2013; Гусев, 2011; Васильчук, 2011; Streletskaya et al., 2013) и в скважинах в районе Сопочной Карги (Соловьев, 1974). Известно, что в районах неотектонического подъема происходит дифференциация грунтовых вод. В антиклинальных структурах происходит концентрация находящихся под большим давлением грунтовых вод, которые по трещинам выходят наружу, намерзая в виде складчатых структур, штоков, диапиров и т.д. Такие структуры отмечены в Большеземельской тундре и на севере Западной Сибири (Кузин, Астафьев, 1975; Слагода и др., 2010; Крицук, 2010 и др.). Нами в термоцирке Сопочной Карги в 2004–2010 гг. наблюдалась диапироподобная структура, состоящая из почти чистого льда (рис. 3). Быстрое новообразование под-



Рис. 3. «Ныряющая» ледяная складка в термоцирке вблизи Сопочной Карги.

земных льдов привело к их столь же скорой деградации, образованию термоцирков, время от времени вскрывающихся на склонах возвышенностей, испытывающих воздымание. В стороны от растущих возвышенностей начали оползать обводненные отложения, образуя складчатые и разрывные структуры, наплывы, оползневые террасы и т.д.

Еще более мелкие деформации четвертичных отложений в береговых обрывах материковой суши и островов Енисейского залива вызваны криогенными процессами. Амплитуда их обычно незначительна, и они легко идентифицируются (Опокина, 2011; Гусев и др., 2013).

Имеются и исторические свидетельства подъема территории на определенных участках. К таким относится район залива Шайтанская Курья у мыса Шайтанский (№ 8 на рис. 1). Здесь, к северу от возвышенности Шайтанского мыса расположено озеро Долгое, бывшее ранее морским заливом. Это превращение связано с неотектоническим воздыманием мыса Шайтанский, приведшим к изменению направления тока реки Сарихи. Раньше она впадала в залив Шайтанская Курья, к северу от мыса Шайтанский. Затем залив превратился в лагуну, соединенную с морем протокой, а сейчас Сариха впадает в Енисейский залив к югу от мыса Шайтанский, а бывшая лагуна сильно обмелела и превратилась в озеро Долгое. Бывшая долина Сарихи представляет собой болотистую заозеренную низменность.

Такой процесс превращения бухты в лагуну можно наблюдать и на реке Глубокой, впадающей в Енисейский залив в 18 км к северу от мыса Шайтанский. Эта река когдато впадала в глубокий залив, который сегодня представляет собой мелкую лагуну, отшнурованную от моря длинной песчаной косой. Интересно отметить, что еще в 1906 г., согласно устным сообщениям зимовщика Симонова и капитана А.Я. Каулина (данные из фондовых материалов Института геологии Арктики), эта лагуна являлась сравнительно глубокой и представляла собой хорошую стоянку для пароходов речного транспорта. В настоящий же момент устьевая лагуна реки Глубокой настолько обмелела, что по ней сильно затруднено плавание даже обыкновенных моторных лодок. При этом береговая линия этого участка побережья достаточно стабильна, на что указывают сохранившиеся на побережье развалины зимовьев XVIII в., отмеченных на карте Ф. Минина 1740 г. (Громов, 1928; Троицкий, 1977).

Другой район — залив Сопочная Карга (№ 6 на рис. 1), по которому имеется старинная карта XIX в., хранящаяся в Таймырском краеведческом музее в Дудинке. На карте показан залив, имеющий размеры, намного превышающие современные и далеко вдающийся в глубь территории. В настоящее время на месте этого залива располагается мелководное озеро Долган (рис. 4), отшнурованное от Енисея песчаными косами. <sup>14</sup>С датировка обломка плавниковой древесины из южной косы показала возраст 820±50 (скорректированный календарный возраст — 760±50) лет (ЛУ-7005). Скорее всего, датировки указывают на время начала подъема территории и еще неполного отшнуровывания залива косами.

Таким образом, в низовьях Енисея и по берегам Енисейского залива широко распространены неотектонические деформации верхней части осадочного чехла Западно-Сибирской плиты. В основном деформации являются складками и разрывами гравитационного оползания со склонов куполообразных поднятий либо на границах перемещающихся блоков фундамента, разломные границы которых обновлялись в позднем кайнозое и в четвертичное время. Неупорядоченная ориентировка осей



Рис. 4. Мелководное озеро Долган вблизи Сопочной Карги. Вдали видна коса, отделяющая озеро от Енисея.

складок, их дисгармоничность обосновывают гравитационную природу дислокаций и противоречат предположениям об их ледниковом происхождении. Зоны динамического влияния глубинных разломов, активизировавшихся в новейшее время, в осадочном чехле могут трассироваться на значительные расстояния, обычно они ярко выделяются в виде протяженных линеаментов (Крапивнер, 2007).

Во многих местах неотектонические деформации рыхлых и вязкопластичных отложений происходят благодаря процессам образования, роста и деградации пластовых льдов, приуроченных к растущим в новейшее время антиклинальным структурам. Значительно меньшая часть складок и разрывов имеет классическую оползневую природу, такие нарушения определяются наклоном современной дневной поверхности. Все это, наряду с периодическими катастрофическими выбросами подмерзлотных газов (Богоявленский, 2014; 2014*a*; Leibman et al., 2014) и редкими землетрясениями, свидетельствует о значительной неотектонической мобильности северной части Западно-Сибирской плиты и прилегающей складчатой области Таймыра.

Выделение неотектонических нарушений в ряду различных деформаций новейшего чехла сопряжено с определенными трудностями. Многие исследователи, опираясь исключительно на структурно-текстурные признаки новейших отложений, определяют их возможный континентальный ледниковый генезис, связывая все многообразие нарушающих их дисклокаций с воздействием ледников. Вместе с тем многие структуры несогласного «срезания» одних литологических комплексов другими, структуры «захвата», следы будинажа — расположенные цепочками линзы менее пластичных пород внутри глинистого осадка, крупные складки и разрывы — могут быть связаны с конседиментационными нарушениями, неотектоническими деформациями, мерзлотными криотурбациями, формирующими структуры и текстуры, напоминающие ледниковые.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Альтер С.П. О происхождении параллельно-линейных гряд и ложбин, развитых на севере Западно-Сибирской низменности // Информационный сборник ВСЕГЕИ. 1960. № 29. С. 77–82.

*Андреев Ю.Ф.* О связи линейно-грядового рельефа с тектоническими структурами на севере Западной Сибири (в области развития многолетней мерзлоты) // Геология и геохимия. 1960. Вып. 3 (IX). С. 76–94.

Баранская А.В., Большиянов Д.Ю., Кучанов Ю.И., Томашунас В.М. Новые данные о дислокациях в четвертичных отложениях полуостровов Ямал и Гыдан и связанных с ними новейших тектонических движениях по результатам экспедиции «Ямал-Арктика-2012» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 3 (97). С. 91–102.

*Баулин В.В., Белопухова Е.Б., Дубиков Г.И., Шмелев Л.М.* Геокриологические условия Западно-Сибирской низменности. М.: Наука, 1967. 214 с.

*Бейзель А.Л.* Гляциодислокации в верхнемеловых отложениях бассейна р. Пясина // Геология и геофизика. 1990. № 4. С. 73–78.

Богоявленский В.И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра // Бурение и нефть. 2014. № 9. С. 13–18.

Богоявленский В.И. Угроза катастрофических выбросов газа из криолитозоны Арктики. Воронки Ямала и Таймыра. Ч. 2 // Бурение и нефть. 2014. № 10. С. 4–8.

Большиянов Д.Ю. Пассивное оледенение Арктики и Антарктиды. СПб.: ААНИИ, 2006. 296 с.

*Брагин П.Е.* Проблемы неотектоники Западно-Сибирской низменности // Уральский геологический журнал. 2001. № 1. С. 69–82.

Васильчук Ю.К. Гомогенные и гетерогенные пластовые ледяные залежи в многолетнемерзлых породах // Криосфера Земли. 2011. Т. 15. № 1. С. 40–51.

Верба М.Л. О механизме новейшей тектоники Усть-Енисейской впадины на примере возникновения линейно-грядовых комплексов рельефа // Ученые записки НИИГА. Сер. Региональная геология. 1964. Вып. 2. С. 58–71.

*Генералов П.П.* Основные черты неотектоники Западно-Сибирской плиты // Региональная неотектоника Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. С. 87–96.

*Громов В.* О современном изменении береговой линии на севере Сибири // Природа. 1928. № 7–8. С. 738–743.

*Гусев Е.А.* Наблюдения за геоморфологическими процессами на севере Западной Сибири (на примере района Сопочной Карги) // Успехи современного естествознания. 2011. № 9. С. 19–22.

Гусев Е.А., Аникина Н.Ю., Арсланов Х.А., Бондаренко С.А., Деревянко Л.Г., Молодьков А.Н., Пушина З.В., Рекант П.В., Степанова Г.В. Четвертичные отложения и палеогеография острова Сибирякова за последние 50 000 лет // Известия русского географического общества. 2013. Т. 145. № 4. С. 65–79.

Данилов И.Д. Эволюция Арктического шельфа в позднем кайнозое и криогенно-гляциальные процессы в его пределах // Криосфера Земли. 1997. Т. 1. № 2. С. 36–41.

Каплянская Ф.А., Никольская М.В., Тарноградский В.Д. Доледниковые морские отложения на севере Западной Сибири (Лескинская толща) // Кайнозой шельфа и островов Советской Арктики. Л.: Севморгеология, 1986. С. 100–109.

Карпов Е.Г. Подземные льды Енисейского Севера. Новосибирск: Наука, 1986. 133 с.

Кизяков А.И., Лейбман М.О., Передня Д.Д. Деструктивные рельефообразующие процессы побережий Арктических равнин с пластовыми подземными льдами // Криосфера Земли. 2006. Т. 10. № 2. С. 79–89. Корчуганова Н.И. Четвертичный структурный план и широтная зональность Западно-Сибирской равнины // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 2013. № 4. С. 5–10.

Крапивнер Р.Б. Признаки неотектонической активности Баренцевоморского шельфа // Геотектоника. 2007. № 2. С. 73–89.

Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири. М.: Научный мир, 2010. 352 с.

Крылов А.В., Гусев Е.А., Кузнецов А.Б., Зархидзе Д.В. Значение моллюсков рода Cyrtodaria для стратиграфии кайнозойских отложений Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 4 (102). С. 5–23.

Кузин И.Л. «Ледниковые» формы рельефа Западно-Сибирской и Русской равнин // Известия русского географического общества. 2006. Т. 138. № 3. С. 41–55.

Кузин И.Л., Астафьев Н.Ф. Криогенные дислокации на западном побережье полуострова Ямал // Известия Всесоюзного географического общества. 1975. Т. 107. № 6. С. 510–515.

*Макаров В.И., Григорьева С.В.* Закономерности новейшей тектонической структуры Сибирской платформы // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2013. № 2. С. 99–114.

*Мунасыпов Н.З.* Геологическое строение и оценка перспектив нефтегазоносности таймырской системы надвигов: Дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Уральский государственный горный университет. Екатеринбург, 2013. 210 с.

*Мусатов Е.Е.* Неотектоника арктических континентальных окраин // Физика Земли. 1996. № 12. С. 72–78.

Мусатов Е.Е. Структура кайнозойского чехла и неотектоника Баренцево-Карского шельфа по сейсмоакустическим данным // Российский журнал наук о Земле. 1998. Т. 1. № 2. С. 157–183.

Опокина О.Л. Происхождение деформаций криолитогенных четвертичных отложений Карского региона: Дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Институт криосферы Земли. Тюмень, 2010. 174 с.

Паталаха Е.И. Тектонофациальный анализ складчатых сооружений фанерозоя (обоснование, методика, приложение). М.: Недра, 1985. 168 с.

Пронкин А.П., Савченко В.И., Хлебников П.А., Эрнст В.А., Филипцов Ю.А., Афанасенков А.П., Ефимов А.С., Ступакова А.В., Бордунов С.И., Суслова А.А., Сауткин Р.С., Глухова Т.А., Перетолчин К.А. Новые данные о геологическом строении и возможной нефтегазоносности зон сочленения Западно-Сибирской и Сибирской платформ // Геология нефти и газа. 2012. № 1. С. 28–42.

*Рогожин В.В.* К истории развития котловин Норильских озер и связи их с новейшими тектоническими движениями // Проблемы геоморфологии и неотектоники платформенных областей Сибири. Новосибирск: Наука, 1970. С. 212–217.

*Сакс В.Н.* К вопросу о молодых тектонических движениях на севере Сибири // Докл. АН СССР. 1945. Т. 47. № 8. С. 596–599.

Сергиенко В.М., Биджиев Р.А. Позднечетвертичная тектоника севера Западно-Сибирской низменности // Бюллетень московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 1983. Т. 58. № 6. С. 73–82.

Слагода Е.А., Мельников В.П., Опокина О.Л. Повторно-инъекционные штоки льда в отложениях Западного Ямала // Докл. РАН. 2010. Т. 432. № 2. С. 264–266.

Соловьев В.А. Опыт изучения подземных льдов Енисейского севера в целях палеогеографических и неотектонических реконструкций // Природные условия Западной Сибири. 1974. Вып. 4. С. 34–48.

Стрелецкая И.Д., Гусев Е.А., Васильев А.А., Каневский М.З., Аникина Н.Ю., Деревянко Л.Г. Новые результаты комплексных исследований четвертичных отложений Западного Таймыра // Криосфера Земли. 2007. Т. 11. № 3. С. 14–28.

13

Стрелецкая И.Д., Гусев Е.А., Васильев А.А., Рекант П.В., Арсланов Х.А. Подземные льды в четвертичных отложениях побережья Карского моря как отражение палеогеографических условий конца неоплейстоцена – голоцена // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 2012. № 72. С. 28–59.

Стрелецкая И.Д., Гусев Е.А., Васильев А.А., Облогов Г.Е., Аникина Н.Ю., Арсланов Х.А., Деревянко Л.Г., Пушина З.В. Геокриологическое строение четвертичных отложений берегов Западного Таймыра // Криосфера Земли. 2013. Т. 17. № 3. С. 17–26.

Троицкий В.А. Материалы по динамике юго-восточных берегов Карского моря // Геоморфология. 1977. № 1. С. 82–86.

Троицкий С.Л. Современный антигляциализм. Критический очерк. М.: Наука, 1975. 164 с.

*Троицкий С.Л., Шумилова Е.В.* Стратиграфия и минералого-петрографические особенности четвертичных отложений в разрезе Воронцовского яра в низовьях Енисея // Литология и условия образования четвертичных отложений севера Евразии. Новосибирск: СО РАН, 1974. С. 5–37.

Усов В.А. Формирование многолетнемерзлых отложений в период бореальной трансгрессии на территории арктической части Енисейского севера // Вестник Ленинградского университета. Сер. Геология. География. 1967. № 4. С. 41–49.

Федоров Г.Б., Антонов О.М., Большиянов Д.Ю. Особенности режима современных тектонических движений Центрального Таймыра // Известия русского географического общества. 2001. Т. 133. № 1. С. 76–81.

Харахинов В.В., Кулишкин Н.М., Шлёнкин С.И. Мессояхский порог — уникальный нефтегазогеологический объект на севере Сибири // Геология нефти и газа. 2013. № 5. С. 34–48.

Шило Н.А., Данилов И.Д. «Великие» оледенения: факты против теории // Наука в СССР. 1984. № 4. С. 44–53.

Leibman M.O., Kizyakov A.I., Plekhanov A.V., Streletskaya I.D. New permafrost feature — deep crater in Central Yamal (West Siberia, Russia) as a response to local climate fluctuations // Geography, environment, sustainability. 2014. Vol. 7. № 4. P. 68–80.

Streletskaya I.D., Gusev E.A., Vasiliev A.A., Oblogov G.E., Molodkov A.N. Pleistocene – Holocene paleoenvironmental records from permafrost sequences at the Kara Sea coasts (NW Siberia, Russia) // Geography, environment, sustainability. 2013. Vol. 6. № 3. P. 60–76.

### E.A. GUSEV

## CENOZOIC SEDIMENT COVER NEOTECTONIC DEFORMATIONS IN THE YENISEI BAY AREA (KARA SEA)

Considered widespread neotectonic deformations of upper part of the West Siberian Plain sedimentary cover in the lower Yenisei River and Yenisei Gulf area. There are some major types of deformations: gravitational slumping folds and faults; faults at the boundaries of moving blocks of the basement, which are reactivated in the Late Cenozoic and Quaternary.

Keywords: neotectonic, Quaternary sediments, the gravitational creep, folds, Yenisei Bay.

№ 3 (105)

УДК 556.545:556.541.4 (282.256.1)

Поступила 17 февраля 2015 г.

# ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЫ ОБСКОЙ ГУБЫ В РАННЕОСЕННИЙ ПЕРИОД

канд. геогр. наук С.А. ЛАПИН, канд. геогр. наук К.В. АРТАМОНОВА, науч. comp. И.А. ГАНГНУС, науч. comp. К.К. КИВВА

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, e-mail: sal58@mail.ru

На базе подробной гидролого-гидрохимической съемки во фронтальной зоне Обской губы проведен анализ ее состояния применительно к условиям ранней осени. Описана гидрологическая структура вод и процессы трансформации водных масс, отображенные в изменении их гидрохимических характеристик. Показано влияние периодических воздействий погодных условий на динамику и химический состав вод, прилегающих к фронтальной зоне.

*Ключевые слова:* Обская губа, фронтальная зона, гидрология, биогенные элементы, растворенный органический углерод.

#### введение

Основанием для проведения настоящей работы явилась разработанная ФГУП «ВНИРО» программа по мониторингу водной среды во фронтальной зоне Обской губы (области активного контакта пресных речных и соленых морских вод). Центральную часть этого участка занимает обширный обской бар, представляющий из себя мощную песчаную плотину шириной до 50 км, разделяющую соленые и пресные воды. Гидрологические и гидрохимические процессы в области взаимодействия двух разнородных водных масс во многих отношениях являются ключевыми для функционирования сложного биоценоза Обской губы и в значительной степени определяют формирование продукционного потенциала всего водоема (Лапин, 2011б, 2014). Именно это обстоятельство послужило основанием для определения данного участка Обской губы местом мониторинговых исследований в период кардинального переустройства ее экосистемы, связанного с частичным разрушением обского бара строящейся (в рамках проекта Ямал-СПГ) широкой судоходной прорезью (рис. 1). Важно подчеркнуть, что, в отличие от законодательно требуемых мероприятий производственного экологического контроля и экологического мониторинга, реализуемых в этом районе, нашу программу отличает четко выраженный экосистемный подход. В целом предлагаемая работа является логическим продолжением предшествовавших комплексных исследований ФГУП «ВНИРО» в Обской губе, выполненных в разные сезоны 2006-2010 гг. (Лапин, 2011б). Важнейшими из них были охватившие большую часть ее акватории подробные гидрологические, гидрохимические, биохимические, гидробиологические и токсикологические исследования, выполненные в 2010 г.: в начале и в конце периода открытой воды (Лапин и др., 2011).

Программа предписывает проведение исследований в период биологической весны на пике половодья сразу после освобождения губы ото льда (конец июля). К сожалению, вследствие задержки с финансированием, работы 2014 г. были осуществлены позднее намеченных сроков — с 13 по 21 сентября. На этот период заказчиком — МЭФ «Чистые моря» — было предоставлено рыболовное судно СРТМк «Бриз», принадлежащее мурманской компании ООО «Арктик-транзит».

#### МЕТОДИКА

Исследования проводились посредством выполнения комплексных станций, заложенных на семи поперечных разрезах, покрывающих акваторию северной части Обской губы от линии, соединяющей мыс Шуберта на восточной стороне о. Белый с северной оконечностью о. Шокальского, до траверза пос. Сабетта (рис. 1).

Расположение разрезов явилось следствием анализа результатов предшествовавших исследований ФГУП «ВНИРО» в этой части губы. Два северных разреза были расположены мористее обского бара, два южных — в речной части губы до бара, а три средних полностью покрывали акваторию губы над баром.



Рис. 1. Батиметрическая карта фронтальной зоны Обской губы и схема расположения разрезов (I–VIII) и станций (1–33). Пунктирная линия — строящийся через бар судоходный канал.

Координаты расположения станций определялись по судовому навигационному оборудованию. Глубины, которые в местах выполнения станций не превышали 30 м, контролировались комплексом судовых эхолотов различного разрешения, а также показаниями зонда. В ходе проведения работ постоянно фиксировалась фактическая метеообстановка, которая в районе исследований отличается высокой динамикой и оказывает существенное влияние на изменчивость параметров среды.

Зондирование водной толщи осуществлялось погружаемым на кабель-тросе многопараметрическим СТД-зондом "EXO-II" (YSI, США) с контролем результатов в режиме реального времени.

Расположение станций на каждом разрезе определялось исходя из особенностей рельефа дна и фактической картины наблюдаемого распределения гидрологических и гидрохимических параметров. Отбор проб воды на гидрохимический анализ производился 5-литровым батометром Van Dorn из поверхностного и придонного горизонтов, а также, в зависимости от структуры вод, из горизонтов над и под слоем скачка. Точность глубины отбора определялась по солености пробы.

Всего за время экспедиции было отобрано 87 проб воды на 33 станциях. Для оценки влияния штормов на структуру вод некоторые станции выполнялись дважды: до и после шторма. Таким образом, работы были ориентированы на получение максимально детальной информации об исследуемом объекте.

Обработка проб воды проводилась согласно методикам, принятым при анализе морских и пресных вод (Руководство..., 2003). Гидрохимический анализ включал в себя определения растворенного в воде кислорода, фосфора фосфатов, кремния силикатов, нитритного, нитратного и аммонийного азота, а также общего железа и растворенного органического углерода. Все гидрохимические параметры в пробах воды (кроме органического углерода) определяли непосредственно после их отбора в гидрохимической лаборатории, развернутой на борту судна, что гарантирует высокую репрезентативность полученных данных. Пробы на растворенный органический углерод (С<sub>орг</sub>) отбирали в специальные емкости, подкисляли соляной кислотой до рН 2,0–2,5 и хранили в холодильнике до определения в них С<sub>орг</sub> в стационарной лаборатории ФГУП «ВНИРО» на приборе ТОС-VCPH (Shimadzu, Япония) методом высокотемпературного сожжения.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ

#### Гидрологические исследования

По гидрологическим критериям время работ может быть отнесено к раннеосеннему периоду. Анализ продольного профиля температуры и солености показывает, что форма клина соленых вод визуально близка к летней конфигурации. При этом его язык постепенно замешивается, а соленость вод в слое над ним уже выше летней, что является признаками постепенной перестройки водной толщи на осенний лад (рис. 2).

Севернее бара наблюдается трехслойная структура вод. Нижняя часть водной толщи в этом районе занята солеными водами Карского моря (до 32 епс), которые упираются в обской бар с северной стороны. Четко выраженный слой скачка также прослеживается только до гребня бара, при этом наблюдается заметное заглубление изогалин и изотерм в мористую сторону. Это косвенно указывает на движение морских вод, медленно натекающих на орографическую преграду (песчаную гряду обского бара). Перемешанные речные воды южнее бара занимают всю губу целиком, а се-



Рис. 2. Продольный профиль (разрез VIII) изменения солености (*a*), епс, и температуры воды (*б*), °С, в северной части Обской губы.

вернее, отрываясь от дна по его гребню и двигаясь над галоклином, они постепенно охлаждаются и осолоняются.

Анализ распределения температуры и солености на поверхностном и придонном горизонтах всей области сопряжения пресных и соленых вод (рис. 3, 4) приводит к схожим заключениям. Поверхностный горизонт целиком контролируется постепенно трансформируемым речным стоком, причем стрежень этого потока в северной части губы вытянут в северо-восточном направлении на остров Шокальского (рис. 3a, 4a). Придонный «ландшафт» южнее бара целиком находится во власти речных вод. При этом направление движения речных вод в придонном слое (до бара, когда их еще можно выделить) совпадает с поверхностным (рис. 36, 46) и проходит в направлении между двумя морскими ложбинами (рис. 1), по которым отмечается встречный поток



Рис. 3. Карта распределения солености, епс, на поверхностном (a) и придонном (б) горизонтах.



Рис. 4. Карта распределения температуры, °С, на поверхностном (a) и придонном ( $\delta$ ) горизонтах.



Рис. 5. Распределение солености, епс, вдоль поперечных разрезов I-VI.

тяжелых морских вод. В целом картина распределения и солености и температуры в придонной области полностью повторяет контуры батиметрической карты района.

Важно заметить, что через восточную ложбину в мористой части губы (рис. 1) идет постепенное заполнение морской водой юго-восточной части северного расширения (надбаровой акватории) Обской губы. В осенний период при постоянном перемешивании и существенно уменьшающемся воздействии речного стока в этой части губы постепенно формируется автономная, относительно изолированная водная масса (Лапин, 2011*a*). Необходимо акцентировать внимание на возможной ревизии этого процесса в будущем в силу происходящих в настоящее время преобразований. Искусственное соединение морской ложбины с русловой строящимся через бар судоходным каналом (рис. 1) приведет к перенаправлению плотностного потока в этот канал и выведению соленых морских вод непосредственно в речную часть Обской губы.

Более наглядно картину сопряжения пресных и соленых вод отражают поперечные профили распределения солености на разрезах I–VI (рис. 5). Четко выделяется движение тяжелых соленых вод через направляющие морских ложбин (разрезы III и IV, отчасти разрез V). Разрезы I и II севернее бара в морской части губы иллюстрируют трехслойную структуру вод. Выраженный галоклин разделяет области, связанные с водами различного генезиса: выше скачка — осолоненной речной воды, ниже — соленой воды Карского моря. По другую (южную, речную) сторону бара на разрезах V и VI наблюдается, соответственно, слегка осолоненная и полностью пресная вода.

Итак, приведенный гидрологический анализ состояния фронтальной зоны на разделе пресных и соленых вод наглядно иллюстрирует процесс взаимодействия и регуляции сопряжения разнородных сред в условиях естественного состояния экосистемы.

#### Гидрохимические исследования

Изучение гидрохимических параметров водной среды позволяет не только характеризовать химические свойства разнородных водных масс, создаваемых граничащими морскими и пресными водами, но и иллюстрировать процессы их биологически обусловленных трансформаций.

На картах распределения содержащихся в воде минеральных форм основных биогенных элементов (рис. 6-8) мы видим не только четко выделяемые речные и морские воды, границы их взаимодействия и смешения, но также отмечаем последствия сезонного процесса формирования в водах фронтальной зоны области их высоких концентраций. Суть данного процесса заключается в том, что большое количество пресноводного диатомового фитопланктона, активно образующегося в речной части губы в период короткой арктической весны сразу после схода льда, отмирает, попадая с течением в область вод с повышенной соленостью. Далее в районе бара в слое турбулентного потока слегка осолоненных вод над галоклином происходит интенсивное разложение органического вещества детрита, следствием которого является резкое повышение в этой области губы содержания в воде минеральных форм биогенных элементов (Пивоваров, 2000): прежде всего кремния, нитратного и аммонийного азота. Севернее и южнее надбаровой акватории потенциал регенерируемых минеральных биогенных элементов быстро осваивается фитопланктоном, а вот в юго-восточной части этой области, которая находится в некоторой «тени» стокового течения обских вод, повышенное содержание указанных элементов сохраняется длительное время: по крайней мере большую часть осеннего периода (Артамонова и др., 2013).



Рис. 6. Карта распределения кремния, µМ, на поверхностном (а) и придонном (б) горизонтах.

Действительно, в слое вод всей надбаровой акватории отмечается повышенное содержание в воде кремния (до 72  $\mu$ M), нитратного (до 11,3  $\mu$ M) и аммонийного (до 10,1  $\mu$ M) азота с максимумом в юго-восточной части области смешения вод. Интересно, что поле повышенного содержания кремния в водах поверхностного слоя как бы раздвигается с юга стрежнем обских вод, в которых его содержание в этот период близко к минимальному (10–20  $\mu$ M). В придонных же слоях, в дополнение к упомянутому выше процессу, пятно максимальных значений кремния рассекается и с противоположной стороны — водами Карского моря, движущимися с севера со стороны морских ложбин (рис. 6).



Рис. 7. Карта распределения нитратного азота, µМ, на поверхностном (*a*) и придонном (б) горизонтах.

Похожая картина в придонных слоях фронтальной зоны наблюдается и в распределении аммонийного азота. Над баром его содержание в воде колеблется от 3 до 10 µM, в то время как в водах севернее и южнее бара не превышает 3 µM. На поверхности аммонийный азот распределен более равномерно и меняется преимущественно в диапазоне от 1 до 2 µM.

Распределение нитратного азота на поверхности аналогично распределению кремния с тем же максимумом в юго-восточной области (до 7,4 µM). В придонном горизонте отмеченный максимум (до 11,3 µM) соединяется с областью повышенных концентраций нитратов в морской ложбине (рис. 7).

Повышенное содержание железа и минерального фосфора является визитной карточкой обских вод и всегда отмечается в речной части губы (Артамонова и др., 2013). Там их количество постоянно пополняется из грунтов в период штормового возмущения и взмучивания водной толщи, что при присущем речной части перемешивании от поверхности до дна приводит к быстрому распределению данных элементов по всей толще вод. При контакте с солеными водами содержание в воде обоих элементов резко снижается, та же ситуация характерна и для испытывающей наименьшую связь со стоковыми водами юго-восточной области северной части губы, где формируется обособленная водная масса (рис. 8). Однако при анализе содержания в обских водах фосфора и железа всегда необходимо иметь в виду, что картина их распределения может серьезно меняться в зависимости от погодных условий в момент проведения исследований. Прямая связь этих элементов не только друг с другом, но и со степенью возмущения водной толщи в момент взятия проб отмечалась во всех наших предшествовавших исследованиях (Лапин, 20116; Артамонова и др., 2013). Таким образом, повышенные концентрации этих элементов, иногда наблюдаемые в придонных слоях зоны смешения, являются следствием вышеизложенных обстоятельств.

Минимальный уровень содержания растворенного кислорода (до 5 мл/л) отмечается в придонных слоях морских вод и в местах осаждения влекомой речным потоком органики. В водах речной части губы он распределен достаточно однородно



Рис. 8. Карта распределения фосфора фосфатов (a),  $\mu$ М, и общего железа ( $\delta$ ),  $\mu$ М, на поверхностном горизонте.



Рис. 9. Карта распределения растворенного органического углерода, мг/л, на поверхностном (*a*) и придонном ( $\delta$ ) горизонтах.

(8-8,5 мл/л), причем имеющиеся различия обусловлены в значительной степени разницей в температуре воды. В целом отмечается весьма характерное для обских вод недосыщение их кислородом (даже летом в период активного фотосинтеза), что связано со спецификой бассейна р. Оби, поставляющего в Обскую губу большое количество различных органических соединений и железа.

Очень важной и информативной характеристикой водной среды является содержание в воде растворенного органического углерода ( $C_{opr}$ ). Этот консервативный и несклонный к резким колебаниям параметр может рассматриваться в качестве некой обобщенной оценки продукционного потенциала вод, что представляет исключительную важность для изучения фронтальных зон, особенно таких сложных и многоплановых, как зона смешения пресных обских и соленых вод Карского моря. На рис. 9 представлено распределение  $C_{opr}$  на поверхностном и придонном горизонтах. Данный параметр описывает зону смешения во всех деталях. Абсолютные значения  $C_{opr}$  плавно меняются от речных 9 мг/л до прибрежно-морских 3 мг/л. В диапазоне изменений от этих двух граничных значений — вся динамика смешения разнородных вод. Полученный результат позволяет утверждать, что данный параметр чрезвычайно показателен для фронтальных областей.

### Периодические изменения в структуре водной толщи вследствие активного ветрового воздействия.

При выполнении работ в южной части исследованной акватории (разрезы VI и VII, puc.1) был зафиксирован классический для данного водоема нагон, обусловленный сильным северным (меридиональным) ветром со скоростью от 20 до 30 м/с. Возможность получить корректное отображение этого процесса появилась вследствие следующих обстоятельств. В условиях относительно спокойного моря нами были завершены работы на разрезе VI (на траверзе мыса Штормовой) и начаты работы на разрезе VII (между мысом Хонарасаля и пос. Сабетта), расположенном приблизительно в 40 км южнее, которые, однако, не были завершены вследствие набиравшего силу



Рис.10. Распределение солености (a,  $\delta$ ), епс, кремния (b, e),  $\mu$ М, и азота нитратов (d, e),  $\mu$ М, на разрезе VI (a, b, d, соответственно) до нагона и разрезе VII (b, c, e, соответственно) после нагона.

шторма. Результаты съемки показали, что данный участок (разрезы VI и VII, рис. 1) по всем гидрологическим и гидрохимическим параметрам может быть отнесен к речной части губы с пресной и обедненной минеральными биогенными элементами обской водой. По окончании продолжавшегося более суток шторма с ветром северного направления, завершающий южный разрез (VII, рис. 1) съемки был повторен в полном объеме. Полученные на нем данные зафиксировали вдоль восточного берега интрузию солоноватых (до 2 епс) обогащенных кремнием (до 50  $\mu$ M) и нитратным азотом (до 8  $\mu$ M) вод с характеристиками, соответствующими водам, расположенным севернее мыса Штормовой (в юго-восточной области зоны смешения). В то же время стоковое течение было отклонено к западному берегу, вдоль которого вода оставалась пресной и обедненной минеральными биогенными элементами. Между этими двумя точками в результате смешения наблюдались промежуточные значения указанных величин (рис. 10).

Таким образом, полученные данные позволили нам показать механизм обогащения биогенными элементами пресноводной части губы, прилегающей к фронтальной зоне с юга, и проиллюстрировать генезис формирования пояса повышенной продуктивности в северной области пресноводной части губы. Впервые этот процесс был описан специалистами ФГУП «ВНИРО» по результатам исследований, проведенных в Обской губе в 2010 г. сразу после ее освобождения ото льда (Лапин, 2011*6*, 2014).

Влияние кратковременных погодных изменений на структуру вод изучалось нами и в самой северной морской части губы (станция 3 разрез I, рис. 1). Работы на ней проводились как в штормовых условиях (ветер северной четверти 15–17 м/с, порывы до 20 м/с и более), так и спустя 20 часов при существенно ослабевшем ветре. Результаты, полученные по данным зондирования, позволяют сделать вывод, что изменения вертикальной структуры в этом случае весьма незначительны и трех-

слойный профиль водной толщи (осолоненный речной поток, мощный слой скачка и подстилающий слой тяжелых карских вод) выглядит достаточно устойчивым.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные ФГУП «ВНИРО» исследования в северной части Обской губы в области смешения пресных обских с солеными карскими водами являются третьими, после экспедиций 2010 г., которые были целенаправленно посвящены изучению фронтальной зоны Обской губы — ключевой части ее сложной экосистемы. Если первые две экспедиции осветили состояние водной среды применительно к биологической весне (сразу после схода льда) и к поздней осени (перед его установлением), то третья описала промежуточную ситуацию, которую можно отнести к раннеосеннему периоду. Кроме того, исследования осени 2014 г. являются последними в череде подобных работ, проведенных на водоеме в его естественном состоянии. Полученные результаты, соответственно, явятся фоновыми для последующего сравнения с изменениями в экосистеме Обской губы, к которым неизбежно приведут начавшиеся здесь масштабные процессы преобразования природы.

Анализ полученных результатов показал следующее:

 в указанный период во фронтальной зоне губы речной сток еще играет важную роль и контролирует всю верхнюю часть профиля над галоклином, причем клин соленых вод по конфигурации близок к своему летнему состоянию;

 – положение самого фронта в 2014 г. отмечается несколько севернее, чем в 2010 г., иначе говоря, клин соленых вод упирается в обской бар с его северной стороны;

– в водах над обским баром четко фиксируется повышенное содержание минеральных форм биогенных элементов, при этом воды речной части губы в исследуемый период ими очень бедны. Область максимальной концентрации регенерированных минеральных биогенных элементов отчетливо отмечается в юго-восточной части северного расширения Обской губы, в своеобразной «стоковой тени» — области минимального воздействия речного стока.

Фиксация мощного меридионального (северного) нагона наглядно и убедительно показала механизм обогащения минеральными биогенными элементами северной области пресноводной части губы и проиллюстрировала процесс создания в этом месте зоны повышенной продуктивности. Таким образом, результаты исследований 2014 г. в северной части Обской губы позволили подтвердить разработанную ранее специалистами ФГУП «ВНИРО» концепцию формирования высокопродуктивной области в данном водоеме, в том числе вследствие процессов регенерации биогенных элементов во фронтальной зоне.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Артамонова К.В., Лапин С.А., Лукьянова О.Н и др. Особенности гидрохимического режима Обской губы в период открытой воды // Океанология. 2013. Т. 53. № 3. С. 357–366.

*Лапин С.А*. Гидрологическая характеристика Обской губы в летне-осенний период // Океанология. 2011*а*. Т. 51. № 6. С. 984–993.

*Лапин С.А.* Гидрохимическая структура вод Обской губы и оценка ее биопродуктивности // Вопросы промысловой океанологии. 2011*б.* Вып. 8. № 1. С. 84–100.

Лапин С.А., Мазо Е.Л., Маккавеев П.Н. Комплексные исследования Обской губы (июль–октябрь 2010 г.) // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 758–762.

*Лапин С.А.* Специфика формирования зон повышенной продуктивности в Обском эстуарии // Труды ВНИРО. 2014. Вып. 152. С. 146–154.

*Пивоваров С.В.* Химическая океанография Арктических морей России. СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. 86 с.

Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / Ред. В.В. Сапожников. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.

S.A. LAPIN, K.V. ARTAMONOVA, I. A. GANGNUS, K.K. KIVVA

# HYDROLOGICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE FRONTAL ZONE IN THE OBSKAYA GUBA IN EARLY AUTUMN

Hydrological and chemical conditions of the frontal zone of the Obskaya Guba during early fall were analyzed based on the detailed survey data. Hydrological structure was described and chemical features revealed the conclusions on transformations of the water masses. The survey also illustrated the influence of the periodic synoptic events on the dynamics and chemical composition of the frontal zone.

Keywords: Gulf of Ob, frontal zone, hydrology, nutrients, dissolved organic carbon.

№ 3 (105)

УДК 550.34.01

Поступила 5 мая 2015 г.

# АНАЛИЗ ДАННЫХ ЗЕМНОПРИЛИВНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ЯПОНСКОЙ АНТАРКТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ SYOWA

## канд. физ.-мат. наук Е.А. СПИРИДОНОВ, науч. сотр. О.Ю. ВИНОГРАДОВА Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, e-mail: sp287@mail.ru

В ходе тестирования новой отечественной программы прогноза земноприливных наблюдений ATLANTIDA3.1\_2014 были подвергнуты значительной дополнительной обработке данные гравиметрических наблюдений на антарктической японской станции Syowa (Kim et al., 2011). Прежде всего, эти данные интересны в связи с достаточно высокой широтой расположения пункта (69,007° ю.ш.). Это позволило, в частности, с большей достоверностью сравнить два широтных распределения гравиметрических амплитудных дельта-факторов для Земли без океана: полученного при построении широко известной модели DDW/NH (Dehant et al., 1999) и рассчитанного в работе (Spiridonov, 2014). В то же время находящийся на станции стабильный и точный сверхпроводящий гравиметр установлен всего в 250 м от береговой линии, т.е. в значительной степени подвержен влиянию океана. В связи с этим интерес также представляла проверка работоспособности в Антарктике современных океанических приливных моделей (в частности, FES2012).

В результате проведенного анализа было выяснено, что наилучшей океанической приливной моделью в антарктическом поясе является ТРХО7.2. Это совпадает с результатами работы (Kim et al., 2011). Однако в целом разброс результатов, получаемых по различным океаническим моделям, оказался достаточно велик. Тем не менее было показано, что в высоких широтах, вне зависимости от выбора океанической приливной модели, применение теоретических амплитудных дельта-факторов для Земли без океана модели DDW/NH более чем в 70 % случаев приводит к более далеким от наблюдений результатам, нежели применение амплитудных факторов нашей модели.

*Ключевые слова:* океанический нагрузочный эффект, приливные амплитудные дельтафакторы.

#### введение

Наиболее точные гравиметрические наблюдения в Антарктиде, как, видимо, и в целом в высоких широтах, были проведены на сверхпроводящем гравиметре ТТ70#016 на японской станции Syowa в период с 01.01.94 по 31.12.02. Гравиметр установлен на основных метаморфических гранитных породах и не подвержен вли-янию подземных вод и почвенной влаги (Iwano et al., 2005). Координаты станции — широта: 69,007° ю.ш.; долгота: 39,586° в.д., высота над уровнем моря +21,493 м. В то же время инструмент находится всего в 250 м от береговой линии, что приводит к существенному влиянию на результаты наблюдений океана.

Результаты обработки данных, полученных на станции Syowa, наиболее полно рассмотрены в работе (Kim et al., 2011). Помимо этого, в работе (Boy et al., 2003) дан анализ полуторагодовых (с июля 1997 г. по декабрь 1998 г.) наблюдений на этом пункте.

При проведении сопоставления наблюдений с теорией авторы указанных работ применяли значения амплитудных дельта-факторов приливных волн для Земли без океана из широко известной модели DDW/NH Вероники Дехант (Dehant et al., 1999), а также широкий набор океанических приливных моделей.

Так, для получения экспериментальных значений амплитуд и фаз различных приливных волн Тэ-Хи Ким (Kim et al., 2011) в качестве программы приливного анализа применял пакет BAYTAP-G (Tamura et al., 1991) и рассматривал шесть океанических приливных моделей: CSR3.0, GOT99.2b, NAO.99b, FES2004, TPXO7.1 и TPXO7.2. Суммарный океанический гравиметрический эффект при этом рассчитывался при помощи пакета GOTIC2 (Matsumoto et al, 2001), в котором точность интегрирования зависит от точности океанической приливной модели, базы данных распределения море–суша и массовой нагрузочной функции Грина. После ряда пробных расчетов были применены комплексные функции Грина, рассчитанные в работе (Okubo, Tsuji, 2001). Эти расчеты основаны на модели полос поглощения (ABM) (Anderson, Given, 1982), в которой были учтены влияния на функцию Грина эффектов внутреннего строения и неупругости Земли, а также эффекты колебательной точечной нагрузки на суточных и полусуточных периодах.

Из сравнения с наблюдаемым океаническим эффектом, а также данными наземных океанографических измерений, наиболее оптимальной Ким (Kim et al., 2011) признает океаническую приливную модель ТРХО7.2. Полученное суммарное (по всем волнам) среднеквадратическое отклонение от наблюдений составило для этой модели 0,194 мкГал.

Здесь необходимо отметить, что в приполярных регионах глобальные океанические модели не являются точными вследствие ограниченного покрытия спутниковой альтиметрией (например, для проекта TOPEX/POSEIDON оно составляет  $\pm 66^{\circ}$ ). Многие исследователи привлекают в этом случае реальные местные данные с мареографов и измерителей придонного давления. Ранее для проверки различных океанических приливных моделей вокруг Антарктиды применялись данные мареографов, гравиметров и GPS (King, Padman, 2005). Для ледовых шельфовых зон был установлен низкий уровень точности моделей CSR3.0 (Eanes, 2002) и NAO.99b (Matsumoto et al., 2000), и обнаружено, что для Антарктики оптимальной является модель TPXO6.2 (Egbert, Erofeeva, 2002). В то же время, в работах (Kobayashi et al., 2004) и (Iwano et al., 2005) было показано, что оптимальной моделью для данного региона является NAO.99b. Однако в перечисленных работах было получено достаточно большое расхождение теории с наблюдениями (0,26 %) по волне M2 для станции Syowa и (-0,10 %) для среднеширотных станций, например Страсбурга.

В цитируемой здесь работе (Kim et al., 2011) также проверялась эффективность добавления к глобальным океаническим приливным моделям данных с мареографов и данных по придонному давлению. Устанавливались различия по фазе и амплитуде волн. Было отмечено, что учет региональных особенностей по измерениям мареографов и измерениям придонного давления снижает отклонения от наблюдений на 5 %. В частности, были применены записи мареографов продолжительностью 30 месяцев (17.05.2005—30.11.2007) и записи придонного давления за 14 месяцев (15.12.2005—17.02.2007). Формальные ошибки приливного анализа для записей мареографов и придонного давления составляют обычно 0,2 и 0,5 % соответственно. Наилучшей моделью, по данным мареографов, является модель NAO.99b ( $\sigma = 1,28$  см

по сумме волн). В то же время по данным о придонном давлении модели FES2004 ( $\sigma = 1,41$  см) и TPXO7.2 ( $\sigma = 1,47$  см) имеют меньшие ошибки нежели NAO.99b ( $\sigma = 1,96$  см). Это, по мнению авторов, говорит о том, что FES2004 и TPXO7.2 больше подходят для глубокого открытого моря, нежели для мелководья. Рассмотрение данных местных мареографических наблюдений оказалось более эффективным для суточных волн. Так, уменьшение разностей наблюдаемых и теоретических кривых в суточной полосе при применении океанической модели TPXO7.2 составляет 29 %. Однако для полусуточных волн оно составило лишь 11 %. Подобная тенденция наблюдалась и для модели FES2004.

Помимо океанического эффекта в районе станции Syowa имеют место и другие локальные специфические эффекты. Например, в работе (Doi et al., 2010) оценено влияние на данные измерений сверхпроводящим гравиметром колебаний массы ледяного антарктического щита. Этот эффект составил порядка 4,8 мкГал за четыре года. Району присущи также специфические атмосферные эффекты, связанные с солнечной радиацией. Так, в работе (Boy et al., 1998) этим эффектам приписывают до 29 % разностей между локально и глобально скорректированным гравиметрическим δ-фактором для волны S1.

Ранее, в работах (Спиридонов, Виноградова; 2013, 2014) обсуждаемые выше данные гравиметрических наблюдений на станции Syowa были проанализированы для трех океанических моделей: CSR3.0, FES95.2 и SCW80. В итоге было установлено, что в целом ближе к наблюдаемым на этой станции значениям океанического эффекта оказались результаты, полученные по нагрузочным дельта-факторам, рассчитанным с учетом диссипации по модели строения Земли IASP91. Все рассчитанные нами значения лучше соответствовали данным наблюдений, нежели полученные при помощи известной программы LOAD89 из пакета ETERNA. Тем не менее наши результаты оказывались систематически дальше от наблюдений, чем значения, полученные по моделям из (Kim et al., 2011). Эти отличия для амплитуд полусуточных и суточных волн составили в относительной мере 10-75 %. Для четырех (O1, P1, Q1 и N2) из восьми исследуемых волн расхождения с экспериментом определялись в основном неточностью вычислений фазы. Однако для оставшихся четырех волн (M2, K1, K2 и S2) требовалось уточнение как фазы, так и амплитуды. К аналогичным выводам для станции Syowa мы пришли и в случае сравнения наших результатов с данными работы (Boy et al., 2003).

Основной целью настоящей работы являлось сравнение описанных выше данных наблюдений на станции Syowa с теоретическими расчетами, проведенными при помощи новой и единственной отечественной программы прогноза земных приливов ATLANTIDA3.1\_2014. Подробное описание программы и теоретических выводов, положенных в основу ее разработки, дано в (Спиридонов, 2014).

Среди основных возможностей программы следует выделить следующие:

1) расчет амплитуд и фаз океанического гравиметрического эффекта с учетом диссипации по шести океаническим приливным моделям (SCW80, CSR3, CSR4, FES95.2, FES2012 и NAO99b);

2) расчет амплитудных дельта-факторов для Земли без океана, а также прогнозных амплитудных факторов и сдвигов фаз для Земли с океаном. Дельта-факторы для Земли без океана, а также нагрузочные дельта-факторы суточных и полусуточных приливных волн и их зависимость от широты рассчитываются согласно работе



Рис. 1. Зависимости амплитудного дельта-фактора волны M2 от широты, рассчитанные в работе (Spiridonov, 2014) для моделей строения Земли PREM и IASP91, а также полученные в работе (Dehant et al., 1999) (модели DDW/H и DDW/NH).

(Spiridonov, 2014). Для остальных групп волн в данной версии программы приняты средние значения дельта-факторов из работы (Dehant et al., 1999) для модели DDW/ NH. О степени различия широтных распределений дельта-факторов указанных двух моделей можно судить, в частности, по рис.1, на котором приведены соответствующие кривые для волны M2. Из рисунка видно, что наибольшие различия между нашей моделью и моделями DDW наблюдаются вблизи экватора и полюса;

3) получение временных рядов приливов. Этот расчет проводит программа PRILET, разработанная Э.А. Боярским и Л.В. Афанасьевой (Spiridonov et al., 2015). Схема вычислений здесь в основном следует программе PREDICT из пакета Венцеля ETERNA 3.3 (Wenzel, 1996). Применяется разложение приливного потенциала на 1200 волн Тамуры (1987).

К дополнительным возможностям следует отнести возможности расчета амплитуд и фаз океанического гравиметрического эффекта в узлах сетки, а также расчет горизонтальных составляющих океанического эффекта. Все вычисления можно производить по двум моделям строения Земли (PREM и IASP91).

Для более детального знакомства с программой ее можно скачать, пройдя по ссылке: <u>https://yadi.sk/d/hszRKInqcrDSC</u>.

Скачиваемый файл ATLANTIDA.EXE представляет собой самораспаковывающийся архив, содержащий все необходимые элементы программы. Программа устанавливается в корень любого диска.

В первом разделе настоящей работы мы проводим сравнение теоретических и наблюдаемых значений океанического гравиметрического эффекта. Под наблюдаемыми здесь понимаются значения амплитуд и фаз приливных волн, полученные путем вычитания из данных наблюдений теоретического приливного сигнала для упругой

Земли без океана. Второй раздел посвящен сравнительному анализу наблюдаемых и прогнозных дельта-факторов и сдвигов фаз приливных волн для Земли с океаном, а также теоретических амплитудных дельта-факторов для Земли без океана.

### СРАВНЕНИЕ РАССЧИТАННОГО И НАБЛЮДАЕМОГО ОКЕАНИЧЕСКОГО ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Амплитуды и фазы наблюдаемого на станции Syowa океанического эффекта представлены в табл. 1. После списка анализируемых волн (первый столбец) в остальных трех парных столбцах последовательно показаны значения амплитуд (в микрогаллах) и фаз (в градусах) наблюдаемого океанического эффекта, вычисленные по наблюдаемым амплитудам и фазам приливных волн при помощи нашей программы ATLANTIDA3.1\_2014, а также полученные в работах работы (Kim et al., 2011) и (Boy et al., 2003).

Таблица 1

	ATLANTIDA3.1_2014		Kim et a	ıl., 2011	Boy et al., 2003	
Волны	Амплитуда,	Фаза,	Амплитуда,	Фаза,	Амплитуда,	Фаза,
	мкГал	градусы	мкГал	градусы	мкГал	градусы
Q1	0,610	18,42	0,612	18,35	0,604	21,18
01	2,445	9,02	2,459	9,01	2,428	9,25
P1	0,650	3,63	0,659	3,64	0,633	2,91
K1	1,939	3,81	1,995	3,67	1,920	3,56
N2	0,493	8,49	0,493	8,47	0,484	9,91
M2	2,321	5,08	2,325	5,06	2,310	5,13
S2	1,526	-4,78	1,528	-4,76	1,520	355,02
K2	0,443	-2,78	0,443	-2,77	0,446	356,45

Наблюдаемый океанический эффект на станции Syowa

Видно, что значения столбца ATLANTIDA3.1\_2014 ближе к соответствующим значениям из работы (Kim et al., 2011). Это связано с тем, что для вычислений наблюдаемого океанического эффекта нами были приняты амплитуды и фазы волн суммарного наблюдаемого прилива именно из работы (Kim et al., 2011), в которой анализируется более длинный ряд наблюдений. Полученные различия при этом связаны с различными значениями принятых в расчетах величин амплитудных дельта-факторов для Земли без океана. Из табл. 2 видно, что принятые в настоящей работе значения амплитудных дельта-факторов (Spiridonov, 2014) несколько выше используемых в работе (Kim et al., 2011) значений из модели DDW/NH. Как следует из рассмотрения последних двух столбцов этой таблицы, наибольшие различия здесь наблюдаются для волн K1 (0,17 %) и P1 (0,09 %). Несколько большее отличие наших значений наблюдаемого океанического эффекта от значений из работы (Boy et al., 2003) (табл. 1) очевидно объясняется тем, что, несмотря на применение в этой работе модели DDW/NH, анализу был подвергнут гораздо более короткий ряд наблюдений. Помимо этого, в двух цитируемых работах применены разные программы приливного анализа. В дальнейшем изложении мы будем применять значения из первого парного столбца табл. 1 (ATLANTIDA3.1\_2014).

Τ	аб.	пиі	įа	2

Волны	ATLANTIDA3.1_2014	DDW/NH	Разность	Разность, %
Q1	1,15509	1,15442	0,00067	5,80.10-2
01	1,15508	1,15439	0,00069	5,97.10-2
P1	1,14999	1,14896	0,00103	8,96.10-2
K1	1,13572	1,13381	0,00191	1,68.10-2
N2	1,16257	1,16216	0,00041	3,53.10-2
M2	1,16257	1,16216	0,00041	3,53.10-2
S2	1,16257	1,16216	0,00041	3,53.10-2
K2	1,16257	1,16216	0,00041	3,53.10-2

Амплитудные дельта-факторы для Земли без океана и их разность (Syowa)

Следует отметить, что относительный вклад океанического эффекта в суммарную наблюдаемую амплитуду прилива у суточных волн в разы меньше, чем у полусуточных. Это очевидно является следствием относительной малости амплитуд объемного прилива полусуточных волн в высоких широтах. Так, амплитуды океанического эффекта составляют для суточных волн от 5,5 % (K1, P1) до 9,2 % (O1) и 11,8 % (Q1) от суммарных наблюдаемых амплитуд. Для полусуточных волн эти отношения меняются от 17,1 % (M2) до 23,7 % (K2). Из этого непосредственно следует, что неопределенности вычисляемых в дальнейшем по данным наблюдений дельта-факторов для Земли без океана и прогнозных дельта-факторов и сдвигов фаз очевидно выше для полусуточных, нежели суточных волн.

Рассмотрим теперь вопрос о степени близости наблюдаемого и предвычисленного по различным океаническим приливным моделям океанического эффекта. Для этого рассмотрим диаграммы, представленные на рис. 2 цвет. вклейки.

На рисунке приведено 8 диаграмм — по одной для каждой из анализируемых волн. Название волны подписано в правом углу каждой диаграммы. По осям абсцисс даны шкалы для косинусных (синфазные) составляющих разностей (прогноз минус наблюдения), а по осям ординат — для синусных (аутфазных) составляющих в микрогаллах. Наблюдаемые значения океанического эффекта для каждой из волн отнесены к началу координат. Каждой цветной точке на диаграммах соответствует одна из 14 анализируемых океанических моделей. Удаление точки от начала координат характеризует амплитуду разностного вектора. В расположенной под рисунком легенде показано, какой цвет точки соответствует какой океанической модели. После названия модели следует постфикс, указывающий на авторство расчета, произведенного по каждой из моделей ( KIM — (Kim et al., 2011); BOY — (Boy et al., 2003); ATL — ATLANTIDA3.1).

Из сравнения различных вариантов расчетов океанического эффекта по модели CSR4.0 следует, что для всех волн результаты наших вычислений (\_ATL) по этой модели ближе к наблюдениям, нежели результаты (Kim et al., 2011). Правда, разности по полусуточным волнам можно считать практически одинаковыми. В то же время наша модель несколько уступает расчетам в (Boy et al., 2003) по трем полусуточным волнам: M2, S2 и K2. Хотя и здесь разности по M2 и K2 практически сопоставимы.

Результаты GOT99.2\_BOY в целом дальше от наблюдений, чем результаты GOT99.2b\_KIM. Исключение составляют волны Q1 и N2. Амплитуды разностных векторов по трем вариантам NAO99b практически одинаковы. Исключение состав-

ляют волны M2 и S2, для которых данные нашей модели NAO99b\_ATL находятся все же дальше от наблюдений.

Из сравнения различных вариантов моделей FES следует, что данные FES99b\_BOY ближе к наблюдениям, нежели данные двух других моделей для волн K1, M2, S2, K2, сопоставимы с моделью FES2004\_KIM для волны P1 и уступают этой модели по волнам Q1, O1 и N2. Модель FES2012\_ATL в целом дальше от наблюдений, нежели предыдущие две модели и сопоставима с ними для Q1, N2, K2. Интересно, что амплитуда эффекта, полученная по моделям FES, падает с увеличением года выпуска модели. Исключение составляет волна K2.

Наименьший разброс значений амплитуд разностных векторов по всем рассматриваемым океаническим моделям характерен для волн К2 и N2. В то же время этим волнам соответствуют наименьшие амплитуды океанического эффекта.

В целом разброс значений амплитуд и фаз океанических моделей на станции Syowa достаточно велик, поэтому получение точных оценок прогнозных дельта-факторов и сдвигов фаз для Земли с океаном здесь весьма затруднительно. Тем не менее с точки зрения применимости того или иного набора теоретических дельта-факторов для упругой Земли без океана можно выделить и нечто общее для всех океанических моделей. При этом неважно, насколько хорошо совпадает данная модель с наблюдениями. Напомним, что наблюдаемый океанический эффект вычислялся исходя из амплитудных факторов, принятых в настоящей работе.

Так же нами вычислялись амплитуды и фазы разностных векторов, т.е. из вектора наблюдаемого океанического эффекта вычитался теоретически предсказанный вектор. Амплитуды этих векторов характеризуют степень близости каждой из рассматриваемых океанических моделей к наблюдениям и характеризуются расстояниями от точек до начала координат на рис. 2 цвет. вклейки. Если взять для расчета разностей наблюдаемый океанический эффект из работы (Kim et al., 2011), вычисленный на основе модели DDW/ NH, то окажется, что полученные в итоге амплитуды разностных векторов в 70,5 % случаев (по 14 станциям и 8 волнам) превысят соответствующие амплитуды, показанные на рис. 2 цвет вклейки. Т.е. вне зависимости от выбора океанической модели амплитуды разностных векторов, полученных в настоящей работе, оказываются меньше, чем полученные в работе (Kim et al., 2011) по амплитудным факторам из DDW/NH. Таким образом, применение для расчета наблюдаемого океанического эффекта на станции Syowa теоретических дельта-факторов модели DDW/NH почти в 70 % случаев приводит к очевидно худшим результатам в отношении близости достаточно большого числа океанических моделей к наблюдениям, нежели применение амплитудных факторов из работы (Spiridonov, 2014).

Из представленных на рис. 2 цвет. вклейки данных следует, что ближе всего к наблюдениям оказалась глобальная модель ТРХО7.2\_КІМ. Ей немного уступают две другие модели ТРХО, а также FES2004\_КІМ. Также достаточно близки к наблюдениям модели NAO99\_BOY и FES99\_BOY. Среди наших моделей в среднем по волнам лучше смотрится NAO99b\_ATL. FES2012 ATL и CSR4.0 почти в полгора раза дальше от наблюдаемых значений.

В то же время авторы работы (Kim et al., 2011) отмечают близость своих моделей ТРХО7.2, FES2004 и NAO99b к результатам наблюдений мареографов и данным о придонном давлении.

В связи с этим в ходе дальнейшего сравнительного анализа прогнозных значений дельта-факторов и сдвигов фаз мы остановимся в основном на четырех океанических моделях из работы (Kim et al., 2011) (ТРХО7.2 и 7.1, NAO99b, FES2004), а также наших результатах, полученных по моделям NAO99b, FES2012 и CSR4.0.

#### ПРОГНОЗНЫЕ ДЕЛЬТА-ФАКТОРЫ И СДВИГИ ФАЗ

Прежде всего отметим, что, несмотря на достаточно большую удаленность наших расчетных значений океанического эффекта на станции Syowa, полученных при помощи трех океанические моделей NAO99b, FES2012 и CSR4.0, от наблюдаемых, они тем не менее приводят к лучшим результатам при расчете прогнозных дельта-факторов для Земли с океаном по сравнению с широко распространенными в настоящее время вычислениями по программам PREDICT, MT80w и T-soft, производимыми по среднему из 6 и 9 океанических моделей. Поскольку значения прогнозных дельта-факторов и сдвигов фаз, получаемые при помощи трех указанных программ для станции Syowa, практически идентичны, то для сравнения мы возьмем значения, полученные по программе PREDICT. Результаты сравнения представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3

		· • •			, ,	T	- / 1	- T
	Набли	одения	PREDICT 9		PREDICT 6		FES2012_ATL	
Волны	8	Фаза,	8	Фаза,	8	Фаза,	8	Фаза,
	0	градусы	0	градусы	0	градусы	0	градусы
Q1	1,301	2,13	1,265	1,83	1,269	1,84	1,292	2,09
01	1,271	0,83	1,253	1,07	1,254	1,05	1,259	0,78
P1	1,217	0,20	1,203	0,26	1,203	0,34	1,207	0,15
K1	1,202	0,21	1,185	0,29	1,186	0,32	1,189	0,24
N2	1,427	1,58	1,369	1,86	1,371	1,82	1,400	1,52
M2	1,402	0,87	1,346	0,32	1,352	0,40	1,371	0,74
S2	1,502	-1,08	1,413	-0,43	1,426	-0,60	1,449	-2,83
K2	1,525	-0,66	1,425	0,82	1,436	0,40	1,477	-1,72
	Наблюдения		NAO99b_ATL		CSR4.0_ATL		Среднее по трем	
Волны	δ	Фаза,	δ	Фаза,	8	Фаза,	δ	Фаза,
		градусы	0	градусы	0	градусы		градусы
Q1	1,301	2,13	1,290	2,10	1,286	2,74	1,289	2,31
01	1,271	0,83	1,267	0,94	1,274	1,81	1,267	1,18
P1	1,217	0,20	1,214	0,28	1,216	0,72	1,212	0,38
K1	1,202	0,21	1,199	0,34	1,197	0,70	1,195	0,43
N2	1,427	1,58	1,387	2,09	1,409	2,66	1,398	2,09
M2	1,402	0,87	1,374	1,20	1,390	0,29	1,378	0,74
S2	1,502	-1,08	1,473	-0,26	1,475	-0,78	1,466	-1,29
K2	1,525	-0,66	1,496	1,16	1,488	-0,65	1,487	-0,40

Наблюдаемые и прогнозные значения дельта-факторов и сдвигов фаз

В первом столбце табл. 3 приведен список рассматриваемых восьми волн, во втором парном столбце даны значения наблюдаемых на станции Syowa амплитудных факторов и сдвигов фаз для Земли с океаном. Далее следуют значения прогнозных дельта-факторов и сдвигов фаз, рассчитанные программой PREDICT при осреднении по 9 и 6 океаническим моделям, а также полученные по программе ATLANTIDA3.1 по трем океаническим моделям (FES2012, NAO99b и CSR4.0). Столбец «Среднее по трем» содержит средние по этим последним трем моделям.

В табл. 4 представлены амплитуды разностных векторов прогнозных дельтафакторов и их среднее по волнам. Они получены путем вычитания наблюдаемых векторов из теоретических. Названия столбцов те же, что и в табл. 3.

Таблица 4

Волны	PREDICT 9	PREDICT 6	FES2012	NAO99b	CSR4.0	MEAN3
Q1	3,66.10-2	3,31.10-2	9,55.10–3	$1,15 \cdot 10^{-2}$	2,04.10-2	1,27.10-2
01	$1,86 \cdot 10^{-2}$	1,77.10-2	$1,18 \cdot 10^{-2}$	4,64.10-3	2,20.10-2	8,88·10 <sup>-3</sup>
P1	$1,45 \cdot 10^{-2}$	$1,41 \cdot 10^{-2}$	9,86.10-3	3,59·10 <sup>-3</sup>	$1,11 \cdot 10^{-2}$	5,95·10 <sup>-3</sup>
K1	$1,69 \cdot 10^{-2}$	1,61.10-2	1,28.10-2	4,30.10-3	$1,12 \cdot 10^{-2}$	8,29·10 <sup>-3</sup>
N2	$5,77.10^{-2}$	5,62.10-2	$2,72 \cdot 10^{-2}$	4,22.10-2	3,23.10-2	$3,11 \cdot 10^{-2}$
M2	$5,78 \cdot 10^{-2}$	5,11.10-2	3,16.10-2	$2,90 \cdot 10^{-2}$	$1,87 \cdot 10^{-2}$	$2,41 \cdot 10^{-2}$
S2	$8,97 \cdot 10^{-2}$	7,65.10-2	6,89·10 <sup>-2</sup>	3,59.10-2	$2,75 \cdot 10^{-2}$	3,62.10-2
K2	$1,07 \cdot 10^{-1}$	9,35.10-2	5,51.10-2	5,62.10-2	3,73.10-2	3,87.10-2
Среднее	4,98.10-2	4,48.10-2	2,84.10-2	2,34.10-2	2,26.10-2	2,07.10-2

Амплитуды разностных векторов прогнозных дельта-факторов

Из табл. З видно, что все без исключения прогнозные дельта-факторы для наших моделей ближе к наблюдаемым, чем рассчитанные программой PREDICT. Наилучшие результаты в этом смысле соответствуют в основном модели CSR4.0 (за исключением волны Q1, по которой первое место занимает FES2012). Модели FES2012 также в основном соответствуют и наименышие фазовые разности. Исключение здесь составляют волны S2 и K2. В то же время фазовые сдвиги, рассчитанные по нашим трем моделям, лежат дальше от их наблюдаемых значений, нежели рассчитанные программой PREDICT. В связи с этим был предпринят анализ амплитуд разностных векторов (табл. 4), который с несколько большей очевидностью демонстрирует преимущества наших расчетов.

Из сравнения приведенных в табл. 4 средних по волнам значений (строка «Среднее») следует, что лучше всего наблюдениям соответствует среднее по трем нашим океаническим моделям («Среднее по трем»). Несколько дальше от наблюдений лежат результаты, полученные по океаническим моделям CSR4.0 и NAO99b. На последнем месте находится FES2012. Амплитуды разностных векторов по суточным волнам в целом меньше у модели NAO99b, а по полусуточным — у CSR4.0. Как правило, отклонения прогнозных факторов от наблюдаемых лежат в пределах первых единиц во втором знаке после запятой. Подобные различия, безусловно, достаточно велики.

Посмотрим теперь на значения дельта-факторов, полученные с применением океанических моделей, наиболее близких как к наблюдаемому океаническому эффекту, так и данным мареографических наблюдений.

В табл. 5 представлены результаты вычислений амплитудных дельта-факторов для Земли без океана. Приведенные значения получены путем вычитания из результатов наблюдений данных океанических моделей FES2004, TPXO7.1 и TPXO 7.2 (Kim et al., 2011). В последних четырех столбцах таблицы приведены средние значения указанных дельтафакторов по трем указанным океаническим моделям («Среднее»), среднеквадратические отклонения от этих средних (σ), а также разности между средними по трем моделям и теоретическими значениями амплитудных факторов, полученными в работах (Spiridonov, 2014) («Разность ATL») и (Dehant et al., 1999) («Разность DDW»).

Из табл. 5 видно, что в целом лучше совпадают с теорией значения амплитудных факторов для суточных волн, а также волны М2. Это же следует из рассмотрения рассчитанных фазовых сдвигов (значения здесь не показаны). В то же время для шести из восьми волн (т.е. в 75 % случаев) значения средних по трем океаническим моделям дельта-факторов лежат дальше от теоретических значений DDW/NH, нежели
Таблица 5

Волны	FES2004	TPXO7.1	TPXO7.2	Среднее	σ	Разность АТL	Разность DDW
Q1	1,1577	1,1638	1,1638	1,1618	0,002906	6,68·10 <sup>-3</sup>	7,35·10 <sup>-3</sup>
O1	1,1509	1,1591	1,1581	1,1560	0,004125	9,53·10 <sup>-4</sup>	<b>1,64·10</b> <sup>-3</sup>
P1	1,1526	1,1506	1,1522	1,1518	0,001907	<b>1,81·10</b> <sup>-3</sup>	<b>2,84·10</b> <sup>-3</sup>
K1	1,1380	1,1393	1,1364	1,1379	0,001835	<b>2,18·10</b> <sup>-3</sup>	<b>4,09·10</b> <sup>-3</sup>
N2	1,1923	1,1743	1,1707	1,1791	0,010147	1,65.10-2	1,69.10-2
M2	1,1625	1,1635	1,1653	1,1638	0,00129	1,20.10-3	<b>1,61·10</b> <sup>-3</sup>
S2	1,1391	1,1559	1,1565	1,1505	0,008489	-1,21·10 <sup>-2</sup>	-1,17.10-2
K2	1,1402	1,1462	1,1536	1,1467	0,005846	-1,59.10-2	-1,55.10-2

Амплитудные дельта-факторы для Земли без океана (Syowa)

от значений, рассчитанных по модели из работы (Spiridonov, 2014). Это, в частности, следует и из анализа разностей, приведенных в столбцах «Разность ATL» и «Разность DDW». Исключение здесь составляют волны S2 и K2, для которых разности, полученные по модели DDW, несколько меньше.

Отклонения рассчитанных дельта-факторов от теоретических лежат в пределах единиц в третьем знаке после запятой для волн O1, P1, K1 и M2. Почти на порядок больше эти разности для N2, S2 и K2. Волна Q1 в данном случае занимает промежуточное положение.

В целом необходимо отметить, что показанные в табл. 5 разности вряд ли можно считать удовлетворительными при обработке результатов измерений, полученных на высокоточном сверхпроводящем гравиметре. К несколько лучшим результатам можно прийти после учета в модели ТРХО7.2 данных местных измерений (мареографы и придонное давление) (Kim et al., 2011).

По данным, приведенным в работе (Kim et al., 2011), нам удалось вычислить поправки к модели ТРХО7.2, учитывающие локальные измерения, и определить значения дельта-факторов и сдвигов фаз для Земли без океана. Результаты этих вычислений сведены в табл. 6. После списка волн в этой таблице приведены значения вычисленных дельта-факторов и сдвигов фаз. Последние два столбца содержат разности вычисленных и теоретических значений дельта-факторов. Столбец «Разность АTL» соответствует нашей модели, а «Разность DDW/NH» модели DDW/NH.

Таблица б

		-		
Волны	δ	Фаза, градусы	Разность ATL	Разность DDW
Q1	1,1622	-0,17	7,12.10-3	7,79.10-3
01	1,1578	-0,06	2,72.10-3	3,41.10-3
P1	1,1518	0,19	$1,77.10^{-3}$	2,80.10-3
K1	1,1357	-0,03	-5,33.10-5	1,86.10-3
N2	1,1670	0,10	4,48.10-3	4,89.10-3
M2	1,1649	-0,66	2,32.10-3	2,73.10-3
S2	1,1570	-0,45	$-5,53 \cdot 10^{-3}$	$-5,12 \cdot 10^{-3}$
K2	1,1543	-1,38	-8,32.10-3	$-7.91 \cdot 10^{-3}$

Амплитудные дельта-факторы для Земли без океана, Syowa. Океаническая модель ТРХО7.2 совместно с измерениями мареографов и данными о придонном давлении

За исключением волн Q1 и O1 значения дельта-факторов из табл. 6 оказались ближе к теоретическим значениям, по сравнению с их значениями из табл. 5. В особенности это относится к волнам N2, S2, K2. В то же время для волн P1, K1, M2 улучшение нельзя назвать принципиальным. Для пяти волн из восьми также стали ближе к нулю значения фаз. Исключение здесь составили волны Q1, M2 и S2. В целом вследствие неопределенности океанической нагрузки на станции Syowa пока не представляется возможным определить амплитудные дельта-факторы основных приливных волн точнее первых единиц в третьем знаке после запятой, а фазы — точнее первых десятых долей градуса.

В то же время из табл. 6, как и табл. 5, следует, что для шести волн из восьми полученные значения наблюдаемых дельта-факторов ближе к нашим теоретическим значениям, а не значениям DDW/NH.

# выводы

Из проведенного сравнения теоретических и наблюдаемых результатов по станции Syowa можно сделать следующие выводы:

 Океанический гравиметрический эффект на станции Syowa, вычисленный для различных океанических приливных моделей и приливных волн по амплитудным дельтафакторам из работы (Spiridonov, 2014), более чем в 70 % случаев ближе к наблюдаемому, нежели полученный по дельта-факторам модели DDW/NH (Dehant et al., 1999).

 Также в целом оказались ближе к наблюдениям теоретические значения дельтафакторов для Земли без океана и прогнозные амплитудные факторы и сдвиги фаз для Земли с океаном, рассчитанные по нашей модели, нежели полученные по DDW/NH.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Спиридонов Е.А., Виноградова О.Н. Гравиметрический океанический нагрузочный эффект. Lamdert Acad. Publishing, 2013. 148 с.

Спиридонов Е.А., Виноградова О.Ю. Сравнение результатов расчета океанического гравиметрического эффекта с данными наблюдений // Физика Земли. 2014. № 1. С.120–128.

Спиридонов Е.А. Программа анализа данных земноприливных наблюдений ATLANTIDA3.1\_2014// Научно-технические разработки. 2014. Т. 93. № 3. С. 3–48.

*Anderson D.I., Given J.W.* Absorbtion band Q model for the Earth // J. Geophys. Res. 1982. Vol. 87. P. 3893–3904.

*Boy J.P., Hinderer J., Gegout P.* Global atmospheric loading and gravity // Phys. Earth Planet. Inter. 1998. Vol. 109. P. 161–177.

*Boy J.P., Llubes M., Hinderer J., Florsch N.* A comparison of tidal ocean loading models using superconducting gravimeter data // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108 (B4). P. 235–249.

*Dehant V., Defraigne P., Wahr J.M.* Tides for a convective Earth // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104. P. 1035–1058.

*Doi K., Shibuya K., Aoyama Y., Ikeda H., Fukuda Y.* Observed gravity change at Syowa Station induced by Antarctic ice sheet mass change // Gravity, Geoid and Earth Observations. IAG Symposia, Chania, Creat, Greece, 23–27 June 2008 / Ed. S.P. Mertirfs. Springer, 2010. P. 557–562.

*Eanes R*. The CSR4.0 global ocean tide model. 2002. URL: ftp://ftp.csr.utexas.edu/pub/tide/ [дата обращения 19.08.2015].

*Egbert G.D., Erofeeva S.Y.* Efficient invers modelling of barotropic ocean tides // J. Atmos. Oceanic. Technol. 2002. Vol. 19 (2). P. 183–204.

*Iwano S., Fukuda Y., Sato T., Tamura Y., Matsumoto K., Shibuya K.* Long-period tidal factors at Antarctica Syowa Station determined from 10 years of superconducting gravimeter data // J. Geophys. Res. 2005. Vol. 110, B10403. doi:10.1029/2004JB03551.

*Kim T-H., Shibuya K., Doi K., Aoyama Y., Hayakawa H.* Validation of global ocean tide models using the superconducting gravimeter data at Syowa Station, Antarctica, and in situ tide gauge and bottom-pressure observations // Elsevier. Polar Science. 2011. Vol. 5. P. 21–39.

*King M.A., Padman L.* Accuracy assessment of ocean tide models around Antarctica // Geophys. Res. Lett. 2005. Vol. 32. L23608.

Kobayashi Y., Iwano S., Fukuda Y. Detailed coastline data around Syowa Station, Antarctica, and calculation of the oceanic tidal loading effects // J. Geod. Soc. Jpn. 2004. Vol. 50. P. 17–26.

*Matsumoto K., Takanezawa T., Ooe M.* Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/ Poseidon altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan // Oceanogr. 2000. Vol. 56. P. 567–581.

*Matsumoto K., Sato T., Takanezawa T., Ooe M.* GOTIC2: A program for computation of oceanic tidal loading effect // J. Geod. Soc. Jpn. 2001. Vol. 47. P. 243–248.

*Okubo S., Tsuji D.* Complex Green's function for diurnal/semidiurnal loading problems // J. Geod. Soc. Jpn. 2001. Vol. 47. P. 225–230.

*Spiridonov E.* Tidal-Amplitude Delta-Factors and Their Dependence on Latitude // Geophysical Research Abstracts. 2014. Vol. 16. EGU2014-1296.

Spiridonov E., Vinogradova O., Boyarskiy E., Afanasyeva L. ATLANTIDA3.1\_2014 for Windows: a software for tidal prediction // Bull. Inf. Marées Terrestres, Feb. 2015. № 149. 12062–12081.

*Tamura Y., Sato T., Ooe M., Ishiguro M.* A procedure for Tidal Analysis with a Bayesian Information Criterion // Geophys. J. Int. 1991. Vol. 104. P. 507–516.

*Wenzel H.G.* The Nanogal Software: Earth Tide Data Processing Package Eterna3.30 // Bull. D'Inf. Maree Terr. 1996. Vol. 124. P. 9425–9439.

## E.A. SPIRIDONOV, O.YU. VINOGRADOVA

# THE ANALYSIS OF THE EARTH TIDE OBSERVATIONS ON JAPANESE ANTARCTIC STATION SYOWA

During testing of the new native program of tidal prediction ATLANTIDA3.1\_2014 the data of gravimetric observations on the Japanese Antarctic station Syowa (Kim et al., 2011) were subjected to substantial additional processing. First of all, these data are interesting due to the rather high latitude of the site location (69°.007 S). This allowed, in particular, to compare with greater reliability two latitudinal distribution of gravimetric amplitude delta-factors: resulting in the construction of a well-known model DDW/NH (Dehant V. et. al., 1999) and calculated in the work (Spiridonov E.A., 2014). At the same time, the stable and accurate superconducting gravimeter located at the station is set just 250 meters from the shoreline, i.e. largely influenced by ocean. In this regard, the interest is also represented in the performance testing in Antarctic of modern oceanic tidal models (in particular, FES2012).

As a result of the analysis it was found that the best oceanic tidal model in the Antarctic zone is TPXO7.2. This coincides with the results of work (Kim et al., 2011). However, in general, the range of results obtained by different ocean models proved to be quite large. Nevertheless, it was shown that at high latitudes, regardless of the choice of oceanic tidal model, application of the theoretical amplitude delta- factors for the Earth without the ocean from DDW /NH model in more than 70 % leads to a more distant from the observation results than the use of amplitude factors of our model.

Keywords: oceanic loading effect, tidal amplitude delta-factors.

№ 3 (105)

УДК 551.465.62 (261.4+268.4)

Поступила 12 августа 2015 г.

# ВЛИЯНИЕ АРКТИКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ АНОМАЛИЙ СОЛЕНОСТИ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ АТЛАНТИКЕ И СЕВЕРО-ЕВРОПЕЙСКОМ БАССЕЙНЕ

млад. науч. comp. A.E. ВЯЗИЛОВА, д-р. геогр. наук Г.В. АЛЕКСЕЕВ, млад. науч. comp. A.A. БАЛАКИН, канд. геогр. наук А.В. СМИРНОВ ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: vae@aari.ru, alexgv@aari.ru, balakin@aari.ru, avsmir@aari.ru

В статье рассматривается влияние аномалий содержания пресной воды в Арктическом бассейне на изменения солености в прилегающей акватории Северной Атлантики. Особое внимание уделено роли летнего таяния в формировании аномалий стока пресной воды из Арктики. Показано, что аномально теплые летние сезоны в Арктике в 1960-е и 2000-е гг. согласуются с появлением в эти периоды отрицательных аномалий солености в Северной Атлантике. Согласованность в развитии аномалий солености в 1950–1960 и 2001–2013 гг. может быть предвестником новой «великой соленостной аномалии» в Северной Атлантике соответствующими последствиями для климата.

*Ключевые слова:* Арктика, субарктическая Атлантика, приток пресной воды, аномалии солености.

# введение

Арктический регион находится под влиянием атмосферных переносов тепла и влаги из низких широт и поступления теплой и соленой воды из прилегающих областей океана. В свою очередь Арктика влияет на глобальный климат через вынос пресной воды и морских льдов в Северную Атлантику (Алексеев и др., 1989; Алексеев и др., 1995; Алексеев, Кораблев, 1994; Сарафанов и др., 2009; Dickson et al., 1996; Griffies, Bryan, 1997; Myers, 2005).

Район субарктической Северной Атлантики является отправной точкой для глобальной термохалинной циркуляции. Здесь процессы взаимодействия между океаном и атмосферой приводят к охлаждению воды, ее погружению в глубь океана в конвективных круговоротах в центральных областях Лабрадорского и Гренландского морей, где она участвует в образовании новой глубинной воды для возвратной ветви атлантического меридионального круговорота.

В табл. 1 представлены составляющие баланса пресной воды в Арктическом бассейне и арктических морях (Арктический океан), рассчитанные по результатам наблюдений (Jahn et al., 2012). Содержание пресной воды, рассчитанное относительно солености 34,8 ‰, и ее поступление в Арктический бассейн и арктические моря представлены в кубических километрах в год. Положительные значения указывают на источники пресной воды, а отрицательные — на сток пресных вод из Арктического океана (Jahn et al., 2012).

# Таблица 1

## Бюджет пресных вод Арктического бассейна

Потоки пресной воды, км <sup>3</sup> /год	Jahn et al., 2012		
Речной сток	3200±110		
Общее количество осадков	$2000 \pm 200$		
Берингов пролив, вода	2500±300		
Берингов пролив, морской лед	$100{\pm}70$		
Проливы Канадского Арктического архипелага, вода	$-3200 \pm 320$		
Пролив Фрама, вода	$-2660 \pm 528$		
Баренцево море, вода	$-90\pm94$		
Баренцево море, морской лед	-40		
Проливы Канадского Арктического архипелага, морской лед	-160		
Пролив Фрама, морской лед	$-2300\pm340$		

Основным источником пресных вод для Арктического региона является речной сток (Serreze et al., 2006), для которого характерно общее увеличение в последние декады (Overeem, Syvitski, 2010; Rabe et al., 2013; White et al., 2007). Помимо речного стока, поступления через Берингов пролив и осадков в объем пресной воды, выносимой в Северную Атлантику, вносит вклад таяние ледников Гренландии (Bamber et al., 2012).

Поток распресненной воды из Арктики выходит через пролив Фрама и далее распространяется Восточно-Гренландским течением и с Западно-Гренландским течением поступает в залив Баффина. Распресненная полярная вода поступает в залив Баффина также через проливы Канадского Арктического архипелага. Оба пути поступления полярной воды находятся в оппозиции — если экспорт льда и пресной воды, проходящий через пролив Фрама, уменьшается, то экспорт распресненной воды через проливы Канадского архипелага увеличивается (Kwok et al., 2004). В конечном счете приток пресной воды в залив Баффина вдоль берегов Гренландии с Восточно-Гренландским и Западно-Гренландским течениями может существенно понизить объем пресной воды, идущий через проливы Канадского Арктического архипелага (Rudels, 2011).

На объем, распределение пресной воды и морских льдов в Арктическом бассейне и пути их выноса из Арктики влияют несколько факторов. В первую очередь это сокращение морского ледяного покрова, наблюдаемое в настоящее время в Арктике, которое сопровождается перераспределением содержания пресной воды в верхнем слое и морского льда (Kwok, Rothrock, 2009).

Предполагается, что на перераспределение пресной воды влияет поступление атлантической воды (AB) в Арктический бассейн (Алексеев и др., 2010; Hakkinen, Proshutinsky, 2004). Увеличенный приток теплых и соленых вод вызывает поднятие верхней границы слоя атлантических вод, тем самым уменьшает толщину верхнего слоя распресненной воды над потоком AB вдоль Евразийского побережья и смещает распресненную воду в сторону Канадской котловины. Перераспределение пресной воды по акватории Арктического бассейна связано также с усилением круговорота Бофорта, сопровождающимся ее аккумулированием в круговороте (Jahn et al., 2010; Proshutinsky et al., 2009).

Результаты исследований подтверждают увеличение запаса пресной воды в верхних слоях Арктического бассейна за период с 1990-х гг. до 2006–2008 гг. (Rabe et al., 2011). Считается, что эти процессы являются результатом преобладания циклонической циркуляции в атмосфере над Арктикой в 1990–2000-е гг. (Proshutinsky et al., 2009), которая усиливает перенос пресных вод, поступивших с речным стоком с Евразии, на восток.

Важным фактором, влияющим на климатические изменения в субарктической Атлантике и на их связь с Арктикой, согласно выводам целого ряда исследований (Dickson et al., 2000; Getzlaff et al., 2005; Houghton, Visbeck, 2002; Wu, Gordon, 2002), считается Североатлантическое колебание (САК), количественная мера которого выражается в виде индексов САК (Hurrell et al., 2003) и Арктической осцилляции (АО).

Наблюдения показывают, что в годы с высоким положительным индексом САК годовой объем льда, выносимого через западную часть пролива Фрама, увеличивается (Dickson et al., 2003). Хотя взаимосвязь между указанными величинами для длительного периода наблюдений не вполне доказана, можно отметить, что увеличение значений индекса САК начиная с 1976 г. сопровождалось увеличением годового выноса льда в Гренландское море на 200 км<sup>3</sup> (Dickson et al., 2000). Уменьшение площади ледяного покрова в Северо-Европейском бассейне и увеличение индекса САК развиваются согласованно в течение последних 40 лет (Deser et al., 2000).

В Северной Атлантике наблюдались три периода опреснения поверхностных вод: в 1970-х гг., 1980-х гг. и 1990-х гг. Большие объемы морского льда отмечались в Гренландском море в конце 1960-х гг., которые с Восточно-Гренландским течением в начале 1970-х гг. поступили в Лабрадорское море. Соленостная аномалия (СА) 1980-х гг., по мнению авторов работы (Belkin et al., 1998), сформировалась в Лабрадорском море в результате суровых зим в начале 1980-х гг. и экспорта пресных вод из Арктики через проливы.

В начале 1990-х гг. в районе Лабрадорского моря также наблюдались зимы с очень низкими температурами воздуха и сильными ветрами, значительными объемами морского льда и образованием новых холодных распресненных вод. Наблюдения в проливе Дэвиса дают основания предполагать, что верхний слой воды в 1990-х гг. стал более пресным и менее плотным по сравнению с 1960-ми гг. (Dickson et al., 2003).

Считается, что образование соленостных аномалий в основном является результатом выноса морских льдов и пресной воды через пролив Фрама. Вынос через проливы Канадского Арктического архипелага имеет меньшее значение для образования СА за исключением 1990-х гг. (Haak et al., 2003). По мнению других авторов (Belkin et al., 1998), СА как 1980-х, так и 1990-х сформировались в результате выноса через проливы Канадского Арктического архипелага.

Воздействие распресненных вод Восточно-Гренландского и Западно-Гренландского течений на глубинные бассейны до сих пор недостаточно изучено. Некоторые исследования предполагают, что экспорт пресных вод из Арктики практически не оказывает влияния на глубокую конвекцию в Лабрадорском море (Myers, 2005). Другие исследования подтверждают, что поступающие в Лабрадорское море потоки пресной воды уменьшают формирование глубинных вод (Lazier, 1980). Ослабление конвекции в 1970-х и 1980-х гг. сопровождалось соленостными аномалиями в эти же годы (Curry et al., 1998). За период с 1950-х по 2007 г. самое сильное ослабление Атлантической термохалинной циркуляции произошло через несколько лет после значительного экспорта распресненных вод в течение поздних 1960-х до середины 1970-х гг. (Jahn et al., 2010). В работе (Dodd et al., 2009) полагают, что влияние экспортируемых пресных вод из Арктики через пролив Фрама на формирование глубинных вод в Северо-Европейском бассейне и Лабрадорском море может зависеть от количества воды в жидкой (вода) или твердой (лед) фазах. Пресные воды в основном остаются в Восточно-Гренландском течении и не распространяются во внутреннюю часть Гренландского моря (Dodd et al., 2009; Gerdes et al., 2005), в то время как большая часть морского льда направляется в Северо-Европейский бассейн (СЕБ).

По мнению (Myers, 2005), экспорт пресных вод через Дэвисов пролив оказывает слабое воздействие на формирование лабрадорской водной массы в отличие от аномалий солености, поступающих через пролив Фрама, поскольку соленостные аномалии, прошедшие через проливы, выносятся Лабрадорским течением по периферии Лабрадорского моря (Gerdes et al., 2008). Выводы работы (Komuro, Hasumi, 2005) также подтверждают, что соленость экспортируемых вод через пролив Фрама имеет большее влияние на глубинную конвекцию в Северной Атлантике. Когда усиливается вынос распресненных вод через проливы Канадского Арктического архипелага, соленость вод, экспортируемых через пролив Фрама, и вод Восточно-Гренландского течения повышается. Распресненные воды оказывают влияние только на западную часть Лабрадорского моря, а более соленые воды, поступающие с Восточно-Гренландским и Западно-Гренландским течениями, усиливают формирование конвекции в Лабрадорском море и море Ирмингера.

Авторы работы (Våge et al., 2009), напротив, считают, что поток пресных вод и морского льда через пролив Дэвиса привел к устойчивой стратификации и повышенному образованию льда в Лабрадорском море в зимние периоды 2007–2008 гг., что стало причиной охлаждения воздуха над центральным районом Лабрадорского моря и сильной потери тепла, в результате которых наблюдалась конвекция в 2007–2008 гг.

# ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для исследования использованы данные океанографических наблюдений за период с 1940 по 2013 г., собранные в базе данных (БД) по Северо-Европейскому бассейну (Кораблев и др., 2007). В базу вошли данные о температуре, солености, и основных гидрохимических параметрах. Примененные процедуры контроля качества позволили исключить сомнительные данные. Для анализа использовались только профили, полученные с помощью батиметрии или СТД.

В ходе исследования база данных была пополнена значительным количеством наблюдений, выполненных в конце прошлого и начале нынешнего столетия, а также океанографическими данными Бедфордского института (Канада, <u>http://dfo-mpo.gc.ca</u>), что дало возможность совместного изучения климатических изменений в СЕБ и Северо-Западной Атлантике (CЗА). Пополненная БД содержит более 500000 океанографических станций, расположенных к северу от 47° с.ш.

В работе также были использованы материалы «Климатологического атласа Северо-Европейского бассейна и северной части Северной Атлантики» (Korablev et al., 2014), созданного совместными усилиями ГНЦ РФ ААНИИ, Геофизического института Бергена, Норвегия, и Национальным океанографическим центром данных, США. Средние за десятилетия климатологические распределения аномалий солености в верхнем слое были рассмотрены для изучения влияния притока пресных вод из Арктики на формирование термахалинных аномалий и конвективных процессов в СЕБ и СЗА.

Для анализа многолетних изменений по данным экспедиционных наблюдений были сформированы временные ряды содержания пресной воды (СПВ) в слое выше залегания изохалины 34,8 ‰ в Арктическом бассейне (9 точек в Канадском бассейне, 8 точек в Евразийском бассейне), рассчитаны летние аномалии СПВ в верхнем слое 100 м в семи точках Северо-Европейского бассейна и Северо-Западной Атлантики (Лабрадорское море и залив Баффина) (рис. 1). Области выбирались исходя из обеспеченности данными. Расчеты выполнялись по данным наблюдений внутри областей радиусом 100 км, осреднялись и относились к центру области. Ряды аномалий содержания пресной воды, построенные по данным в выбранных областях, позволяют рассмотреть временные и пространственные изменения в поступлении арктической пресной воды и ее распространение по акватории Северной Атлантики.

Выбор значения солености, относительно которого рассчитывается содержание пресной воды, может задаваться в достаточно широких пределах. В данном исследовании использовалось значение 34,8 ‰, которое считается приблизительной средней соленостью для Арктического бассейна (Aagaard, Carmack, 1989). Расчет проводился по формуле (1).

$$FWC = \int_{h}^{0} \frac{S_{ref} - S}{S_{ref}} dz, \quad (1)$$



Рис. 1. Расположение областей для расчета содержания пресной воды в Арктике (*a*) и Северной Атлантике (*б*) и расположение разрезов (в): *1* — в заливе Баффина, *2* — в проливе Фрама.

где *FWC* — содержание пресной воды в м, *S* — соленость, *S*<sub>*ref*</sub> — референсное значение солености, *h* — глубина залегания нижней границы слоя, в котором проводилось интегрирование.

Распространение потоков распресненных вод можно также идентифицировать по аномалиям солености на вертикальных разрезах в западной части пролива Фрама (79,5° с.ш.) и северной части залива Баффина (76° с.ш.). Разрезы были построены по осредненным за десятилетия данным Климатологического атласа (Korablev et al., 2014).

# ВЛИЯНИЕ ЛЕТНИХ ПОТЕПЛЕНИЙ В АРКТИКЕ НА СОДЕРЖАНИЕ ПРЕСНОЙ ВОДЫ В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ

На графиках временного хода летних аномалий температур воздуха (июнь–август) для Арктики и Северной Атлантики выделяется потепление в 1950-х до начала 1960-х гг. (рис. 2), которое наиболее ярко выражено в регионе Северо-Западной Атлантики. Период потепления сменился похолоданием, при котором температуры воздуха в СЕБ достигли минимума в середине 1980-х гг. В Лабрадорском море и заливе Баффина минимальные летние температуры воздуха наблюдались в начале 1970-х гг.

В морской Арктике также наблюдалась повышенная летняя температура воздуха в 1950-е и в начале 1960-х гг., сменившаяся понижением и последующим быстрым ростом



Рис. 2. Летние аномалии температуры воздуха (июнь–август) в морской Арктике (Алексеев и др., 2010) по данным метеостанций (*a*), в СЕБ, 60–82° с.ш., 40° з.д. – 20° в.д. ( $\delta$ ), в СЗА, 56–82° с.ш., 40–80° з.д. (*в*).

летних температур с начала 1990-х гг. (рис. 2*a*). Для СЕБ и СЗА характерно повышение летних температур с середины 1990-х гг. по настоящее время, что хорошо заметно на графике аномалий по данным метеостанций (рис. 2*6*, 2*6*).

Большие положительные аномалии температуры воздуха в Арктике сопровождались усиленным таянием снега и льда и увеличением стока с окружающих материков (Alekseev et al., 2000; Shiklomanov et al., 2000), что способствовало увеличению поступления пресной воды в арктические моря, Арктический бассейн, Канадские проливы и пролив Фрама.

За летними потеплениями следуют отрицательные аномалии солености в Северной Атлантике. Наиболее известная из них, названная «великой соленостной аномалией» (BCA) (Dickson et al., 1988), наблюдалась в 1970-х гг. Другие СА были отмечены в 1980-х гг. (Belkin et al., 1998) и в 1990-х гг. (Belkin, 2004). СА, наблюдавшиеся в 1968-1970 и 1980-1982 гг., связывались с увеличением экспорта морского льда через пролив Фрама (Zhang, Vallis, 2006). Выносу морского льда через проливы Канадского Арктического архипелага придается меньшее значение в формировании СА, за исключением СА 1990-х гг. (Haak et al., 2003).

# АНОМАЛИИ СОДЕРЖАНИЯ ПРЕСНОЙ ВОДЫ В АРКТИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ

Ряды аномалий содержания пресной воды (СПВ) в слое выше залегания изохалины 34,8 ‰ в Арктическом бассейне и в верхнем слое 100 м в Северо-Европейском бассейне и Северо-Западной Атлантике (Лабрадорское море и залив Баффина) позволяют рассмо-

треть временные и пространственные изменения в поступлении арктической пресной воды и ее распространении по акватории Северной Атлантики (рис. 3–6).

По рассчитанным значениям СПВ были сформированы временные ряды аномалий для Евразийского и Канадского бассейнов. По построенным графикам содержания пресных вод в слое выше залегания изохалины 34,8 ‰ можно отметить согласованные уменьшение СПВ вдоль берегов Евразии и увеличение СПВ у Канадского архипелага начиная с 2002 г., когда увеличилось поступление АВ в Арктический бассейн (рис. 3).



Рис. 3. Аномалии содержания пресной воды в слое выше изохалины 34,8 ‰ в районах Арктического бассейна, прилегающих к Канадскому Арктическому архипелагу (1) и Евразийскому побережью (2). Жирные прямые линии показывают тренд за 2002–2013 гг.

В пространственном распределении СПВ (рис. 4) видно повышенное содержание СПВ в Канадской котловине в 2000–2014 гг., аномалии которого показывают увеличение СПВ на акватории Арктического бассейна, прилегающей к Аляске и Канадскому Арктическому архипелагу.

Таким образом, в последнее десятилетие произошло перераспределение запаса пресных вод, одной из причин которого, по нашему мнению, является увеличение притока воды из Северной Атлантики в Арктический бассейн, приведшее к подъему верхней границы слоя атлантических вод в Евразийском бассейне и к смещению распресненных вод в Канадский бассейн. Другая причина — это преобладание циклонической циркуляции в атмосфере над Арктическим бассейном, которое способствовало оттоку пресных вод, поступивших с Евразийским речным стоком, в круговорот моря Бофорта (Morison et al., 2012; Proshutinsky et al., 2009).

Предполагается, что увеличение содержания пресных вод у Канадского Арктического архипелага способствует наблюдаемому усилению выноса морских льдов и пресной воды через проливы архипелага (Koenigk et al., 2007), а также через пролив Фрама (Spreen et al., 2013).



Рис. 4. Распределение СПВ в слое выше изохалины 34,8 ‰ в 2000–2014 гг. (*a*) и аномалии СПВ в 2000–2014 гг. относительно среднего СПВ за 1970-е гг. (*б*).

# ИЗМЕНЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ПРЕСНОЙ ВОДЫ И СОЛЕНОСТИ В ВЕРХНЕМ СЛОЕ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

По изменениям содержания пресной воды в верхнем слое 100 м можно проследить пути распространения положительных аномалий СПВ. В 1950–1960-е гг. распресненная вода из проливов Канадского Арктического архипелага распространилась через залив Баффина, далее через Дэвисов пролив в конце 1960-х, и в начале 1970-х гг. положительные аномалии СПВ проявились в Лабрадорском море в районе корабля погоды «Б» (рис. 5).



Рис. 5. Летние аномалии содержания пресной воды, номера точек на графиках соответствуют точкам на рис. 16: 1 — 76° с.ш. 74° з.д. (северная часть залива Баффина); 2 — 71° с.ш. 55° з.д. (восточная часть залива Баффина); 3) — 66,5° с.ш. 59° з.д. (пролив Дэвиса); 4 — 78° с.ш. 7° в.д. (восточная часть пролива Фрама); 5 — 78° с.ш. 10° з.д. (западная часть пролива Фрама); 6 — 67,5° с.ш. 26,25° з.д. (Датский пролив); 7 — 56,5° с.ш. 51° з.д. (Лабрадорское море).

Авторы работы (Dickson et al., 1988) считали понижение солености в Лабрадорском море в начале 1970-х гг. следствием усиления притока арктических вод с Восточно-Гренландским течением через пролив Фрама в 1960-х гг., на что позднее указывалось в работе (Houghton, Visbeck, 2002). Однако причина увеличения стока распресненной воды из Арктического бассейна в этих работах не названа. Из нашего анализа следует, что основная причина увеличения опреснения в Северной Атлантике в 1970-е гг. — летнее потепление в Арктике в 1950-е гг. и в начале 1960-х гг.

В 1990–2000-е гг. за новыми более сильными летними потеплениями в Арктике также последовало увеличение СПВ в заливе Баффина, проливе Дэвиса и в западной части пролива Фрама (рис. 5). В этот же период наблюдается значительное содержание пресных вод в заливе Баффина у берегов Гренландии (рис. 5). Высокие положительные аномалии содержания пресных вод в этом районе связаны как с притоком распресненных вод из Арктики, так и увеличенным таянием ледников Гренландии в последние десятилетия (Bamber et al., 2012).

В проливе Фрама можно выделить оппозицию аномалий СПВ в восточной части и в западной части пролива (рис. 5). В западной части проходит поток распресненных вод из Арктики, а в восточной части — поток теплых и соленых атлантических вод. В 1960-е гг. сильная положительная аномалия СПВ отмечена и в восточной части пролива, а в западной части наблюдения отсутствовали. Можно лишь предположить, что сильная положительная аномалия СПВ проходила и через западную половину пролива, где обычно сосредоточен основной поток распресненной воды и льда из Арктического бассейна. Рис. 6 (см. цвет. вклейку) подтверждает распространение крупных аномалий солености одного знака на большую часть пролива.

На рисунке 6 цвет. вклейки представлено распределение аномалий солености на разрезах в заливе Баффина (по 76° с.ш.) и в западной части пролива Фрама (по 79,5° с.ш.) в разные десятилетия по данным Климатологического атласа (Korablev et al., 2014), по которым можно проследить их эволюцию на протяжении последних шести десятилетий. Отрицательная аномалия солености 1960-х гг., проявившаяся как в проливе Фрама, так и в заливе Баффина, является предвестником «великой соленостной аномалии» (ВСА), наблюдавшейся в акватории Северной Атлантики в 1970-х гг.

Основным источником для СА 1990-х гг. был вынос морских льдов и пресной воды через проливы Канадского Арктического архипелага (Belkin, 2004), что подтверждается отрицательной аномалией солености в 1990-х гг. на разрезе в северной части залива Баффина, в то время как в проливе Фрама наблюдалась положительная аномалия солености. В последнее десятилетие 2001–2012 гг. в заливе Баффина видна обширная отрицательная аномалия солености, проявляющаяся, но в меньшей степени, и в проливе Фрама. Такая согласованность в формировании аномалий похожа на 1960-е гг., что может быть предвестником новой «великой соленостной аномалии» в Северной Атлантике с соответствующими последствиями для климата.

На рис.7 (см. цвет. вклейку) представлено распределение аномалий средней солености в верхнем слое Северной Атлантики по десятилетиям от 1950-х к 2001–2013 гг., показывающее 60-летний цикл эволюции от положительной аномалии 1950-х гг. через отрицательные аномалии 1970-х и 1980-х гг. к положительной аномалии 2001–2013 гг. В 1950-е гг. и 2001–2013 гг. в акватории Северной Атлантики отмечена повышенная соленость в результате увеличенного притока атлантических вод из низких широт. В 1970-е и 1980-е гг. для всего бассейна Северной Атлантики характерен отрицательный соленостный фон вследствие выноса распресненных вод из Арктики. Можно ожидать, что и за максимумом солености 2001–2013 гг. последует новая отрицательная аномалия, подобная «великой соленостной аномалии» 1970–1980-х гг.

# выводы

Увеличение притока атлантических вод в Арктику в 1990–2000-е гг. привело к смещению запаса пресных вод в Канадский бассейн и уменьшению содержания распресненных вод над областями распространения атлантической воды. Влияние летних потеплений в Арктике отражается в содержании пресных вод Арктического бассейна и дальнейшем их поступлении в Северную Атлантику через пролив Фрама и проливы Канадского Арктического архипелага.

В Северо-Европейском бассейне и Северо-Западной Атлантике отмечаются периоды распреснения верхнего слоя в начале 1960-х, середине 1970-х и в 2000-е гг., связанные с усилением притока из Арктики и летнего таяния (в начале 1960-х и в 2000-е гг.). В последнее десятилетие большая часть потоков пресных вод проходит через проливы Канадского Арктического архипелага. Но с 2000 г. по настоящее время наблюдается общее повышение солености поверхностного слоя в рассматриваемом районе Северной Атлантики за счет увеличении притока из низких широт.

60-летний цикл в развитии аномалий солености от 1950-х к 2001–2013-м гг. может иметь продолжение в формировании новой «великой соленостной аномалии» в Северной Атлантике с соответствующими последствиями для климата.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев Г.В., Богородский П.В., Нагурный А.П. Структура термохалинных полей в районе циклонической циркуляции и поднятия донных вод Гренландского моря // Структура и изменчивость крупномасштабных океанологических процессов и полей в Норвежской энергоактивной зоне / Под ред. Ю.В. Николаева, Г.В. Алексеева. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. С. 37–43. Алексеев Г.В., Иванов В.В., Кораблев А.А. Межгодовая изменчивость глубокой конвекции в Гренландском море // Океанология. 1995. Т. 35. № 1. С. 45–52.

Алексеев Г.В., Иванов Н.Е., Пнюшков А.В., Балакин А.А. Изменения климата в морской Арктике в начале XXI века // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 3 (86). С. 22–34.

Алексеев Г.В., Кораблев А.А. Океанографические условия развития глубокой конвекции // Закономерности крупномасштабных процессов в Норвежской энергоактивной зоне и прилегающих районах. СПб.: Гидрометеоиздат, 1994. С. 79–93.

Кораблев А.А., Пнюшков А.В., Смирнов А.В. Создание океанографической базы данных для мониторинга климата в Северо-Европейском бассейне Арктики // Труды ААНИИ. 2007. Т. 447. С. 85–108. Сарафанов А.А., Соков А.В., Фалина А.С. Потепление и осолонение лабрадорской водной массы и глубинных вод в субполярной Северной Атлантике на 60 с.ш. в 1997–2006 гг. // Океанология. 2009. Т. 49. С. 209–221.

*Aagaard K., Carmack E.C.* The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation // J. Geophys. Res. 1989. T. 94. № C10. P. 14485–14498.

Alekseev G. V., Bulatov L.V., Zakharov V.F. Fresh water freezing/melting cycle in the Arctic Ocean // The Freshwater Budget of the Arctic Ocean / Ed. E.L. Lewis, et al. Kluwer Academic Press, 2000. P. 589–608. Bamber J.L., Broeke M. Van Den, Ettema J., Lenaerts J., Rignot E. Recent large increases in freshwater fluxes from Greenland into the North Atlantic // Geophys. Res. Lett. 2012. Vol. 39. № L19501. P. 8–11. Belkin I.M. Propagation of the «Great Salinity Anomaly» of the 1990s around the northern North Atlantic // Geophys. Res. Lett. 2004. Vol. 31. № L08306. P. 1–4.

*Belkin I.M., Levitus S., Antonov J.I., Malmberg S.A.* «Great Salinity Anomalies» in the North Atlantic // Prog. Oceanogr. 1998. Vol. 41. P. 1–68.

*Curry R.G., McCartney M.S., Joyce T.M.* Oceanic transport of subpolar climate signals to mid-depth subtropical waters // Nature. 1998. Vol. 391. P. 575–577.

Deser C., Walsh J.E., Timlin M.S. Arctic sea ice variability in the context of recent atmospheric circulation trends // J. of Clim. 2000. Vol. 13. № 3. P. 617–633.

*Dickson R., Lazier J., Meincke J., Rhines P., Swift J.* Long-term coordinated changes in the convective activity of the North Atlantic // Prog. Oceanogr. 1996. Vol. 38. № 97. P. 241–295.

*Dickson R.R., Curry R., Yashayaev I.* Recent changes in the North Atlantic. // Philos. Trans. R. Soc. London. 2003. Vol. 361. P. 1917–1933.

Dickson R.R., Meincke J., Malmberg S.-A., Lee A.J. The «Great Salinity Animaly» in the Northern North Atlantic 1968–1982 // Prog. Oceanogr. 1988. Vol. 20. P. 103–151.

*Dickson R.R., Osborn T.J., Hurrell J.W., Meincke J., Blindheim J., Adlandsvik B., Vinje T., Alekseev G., Maslowski W.* The Arctic Ocean Response to the North Atlantic Oscillation // J. of Clim. 2000. Vol. 13. № 15. P. 2671–2696.

Dodd P.A., Heywood K.J., Meredith M.P., Naveira-Garabato A.C., Marca A.D., Falkner K.K. Sources and fate of freshwater exported in the East Greenland Current // Geophys. Res. Lett. 2009. Vol. 36. № L19608. P. 1–5. Gerdes R., Hurka J., Karcher M., Kauker F., Koeberle C. Simulated history of convection in the Greenland and Labrador seas, 1948–2001 // The Nordic Seas: an integrated perspective / Ed. H. Drange et al. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 2005. P. 221–238.

Gerdes R., Karcher M., Köberle C., Fieg K. Simulating the long-term variability of liquid freshwater export from the arctic ocean // Arctic-Subarctic Ocean Fluxes: Defining the Role of the Northern Seas in Climate / Ed. R.R. Dickson, J. Meincke, P. Rhines. Dordrecht: Springer Science, 2008. P. 405–425. Getzlaff J., Böning C.W., Eden C., Biastoch A. Signal propagation related to the North Atlantic overturning // Geophys. Res. Lett. 2005. Vol. 32. № L09602. P. 1–4.

*Griffies S.M., Bryan K.* A predictability study of simulated North Atlantic multidecadal variability // Clim. Dyn. 1997. Vol. 13. P. 459–487.

Haak H., Jungclaus J., Mikolajewicz U., Latif M. Formation and propagation of great salinity anomalies // Geophys. Res. Lett. 2003. Vol. 30. № 9. P. 1–4.

Hakkinen S., Proshutinsky A. Freshwater content variability in the Arctic Ocean // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109. P. 1–19.

Houghton R.W., Visbeck M.H. Quasi-decadal Salinity Fluctuations in the Labrador Sea // J. Phys. Oceanogr. 2002. Vol. 32. P. 687–701.

*Hurrell J.W., Kushnir Y., Ottersen G., Visbeck M.* An Overview of the North Atlantic Oscillation // The North Atlantic Oscillation: Climate Significance and Environmental Impact. Washington DC: American Geophysical Union, 2003. Geophysical Monograph Series. Vol. 134. P. 1–35.

*Jahn A. et al.* Arctic Ocean freshwater: How robust are model simulations? // J. Geophys. Res. 2012. Vol. 117. P. 1–22.

Jahn A., Tremblay B., Mysak L. A., Newton R. Effect of the large-scale atmospheric circulation on the variability of the Arctic Ocean freshwater export // Clim. Dyn. 2010. Vol. 34. № 1989. P. 201–222. Koenigk T., Mikolajewicz U., Haak H., Jungclaus J. Arctic freshwater export in the 20th and 21st centuries // J. Geophys. Res. Biogeosciences. 2007. Vol. 112. P. 1–11.

*Komuro Y., Hasumi H.* Intensification of the Atlantic Deep Circulation by the Canadian Archipelago Throughflow // J. Phys. Oceanogr. 2005. Vol. 35. P. 775–789.

Korablev A.A., Smirnov A. V., Baranova O.K. Climatological atlas of the Nordic Seas and Northern North Atlantic. URL: http://www.nodc.noaa.gov/OC5/nordic-seas/ [дата обращения: 14.06.2014]. Kwok R., Cunningham G.F., Pang S.S. Fram Strait sea ice outflow // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109. № C01009. P. 1–14.

*Kwok R., Rothrock D.A.* Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008 // Geophys. Res. Lett. 2009. Vol. 36. № L15501. P. 1–5.

Lazier J.R.N. Oceanographic conditions at Ocean Weather Ship Bravo, 1964–1974 // Atmosphere– Ocean. 1980. Vol. 18. № 3. P. 227–238.

*Morison J., Kwok R., Peralta-Ferriz C., Alkire M., Rigor I., Andersen R., Steele M.* Changing Arctic Ocean freshwater pathways // Nature. 2012. Vol. 481. № 7379. P. 66–70.

*Myers P.G.* Impact of freshwater from the Canadian Arctic Archipelago on Labrador Sea Water formation // Geophys. Res. Lett. 2005. Vol. 32. C. 1–4.

Overeem I., Syvitski J.P.M. Shifting Discharge Peaks in Arctic Rivers, 1977–2007 // Geogr. Ann. 2010. Vol. 92. № 2. P. 285–296.

Proshutinsky A., Krishfield R.A., Timmermans M.-L., Toole J., Carmack E., McLaughlin F., Williams W.J., Zimmermann S.L., Itoh M., Shimada K. Beaufort Gyre freshwater reservoir: State and variability from observations // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. № C00A10. P. 1–25.

Rabe B., Dodd P.A., Hansen E., Falck E., Schauer U., MacKensen A., Beszczynska-Möller A., Kattner G., Rohling E.J., Cox K. Liquid export of Arctic freshwater components through the Fram Strait 1998-2011 // Ocean Sci. Discuss. 2013. Vol. 9. P. 91–109.

*Rabe B., Karcher M., Schauer U., Toole J.M., Krishfield R.A., Pisarev S., Kauker F., Gerdes R., Kikuchi T.* An assessment of Arctic Ocean freshwater content changes from the 1990s to the 2006–2008 period // Deep. Res. I. 2011. Vol. 58. P. 173–185.

*Rudels B.* Volume and freshwater transports through the Canadian Arctic Archipelago-Baffin Bay system // J. Geophys. Res. Ocean. 2011. Vol. 116. P. 1–14.

Serreze M.C., Barrett A.P., Slater A.G., Woodgate R.A., Aagaard K., Lammers R.B., Steele M., Moritz R., Meredith M., Lee C.M. The large-scale freshwater cycle of the Arctic // J. Geophys. Res. Ocean. 2006. Vol. 111. № C11010. P. 1–19.

*Shiklomanov I.A., Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Peterson B.J., Vorosmarty C.J.* The dynamics of river water inflow to the Arctic Ocean // The Freshwater Budget of the Arctic Ocean / Eds. E.L. Lewis, et al. Kluwer Academic Press, 2000. P. 281–296.

Spreen G., Hansen E., Kwok R., Gerland S. Fram Strait Sea Ice Volume Export 1992–2012 from Combined ULS and Satellite Data // American Geophysical Union, Fall Meeting., 2013. URL: http://brage.bibsys. no/xmlui/bitstream/handle/11250/194641/1/%C3%A5rsmelding2013.pdf [дата обращения 20.08.2015] Våge K., Pickart R.S., Thierry V., Reverdin G., Lee C.M., Petrie B., Agnew T. a., Wong A., Ribergaard M.H. Surprising return of deep convection to the subpolar North Atlantic Ocean in winter 2007–2008 // Nat. Geosci. 2009. Vol. 2. № 1. P. 67–72.

White D., Hinzman L.D., Alessa L., Cassano J., Chambers M., Falkner K., Francis J., Gutowski W.J., Holland M., Max Holmes R., Huntington H., Kane D.L., Kliskey A., Lee C., McClelland J., Peterson B.J., Scott Rupp T., Straneo F., Steele M., Woodgate R., Yang D., Yoshikawa K., Zhang T. The arctic freshwater system: Changes and impacts // J. Geophys. Res. Biogeosciences. 2007. Vol. 112. № G04S54. P. 1–21.

*Wu P., Gordon C.* Oceanic influence on North Atlantic climate variability // J. of Clim. 2002. Vol. 15. № 14. P. 1911–1925.

Zhang R., Vallis G.K. Impact of Great Salinity Anomalies on the Low-Frequency Variability of the North Atlantic Climate // J. of Clim. 2006. Vol. 19. P. 470–482.

A.E. VIAZILOVA, G.V. ALEKSEEV, A.A. BALAKIN, A.V. SMIRNOV

# INFLUENCE OF THE ARCTIC ON SALINITY ANOMALY FORMATION IN THE NORTH-WEST ATLANTIC AND NORTH EUROPEAN BASIN

Influence of fresh water content in the Arctic basin on salinity variations in neighboring water areas of the North Atlantic is examined. Special attention is given to the role of summer melting in formation of anomalies of fresh water flows from the Arctic. Abnormal warm summer seasons in Arctic in 1960s and 2000s are coherent with appearance of negative salinity anomalies in the North Atlantic during the indicated periods. Consistency in salinity anomalies evolution in 1950-60s and 2001–2013s could be a precursor of a new "Great salinity anomaly" in the North Atlantic with the relevant consequences for the climate.

Keywords: Arctic, subpolar Atlantic, fresh water inflow, salinity anomaly.

УДК 551.466.713

Поступила 17 августа 2015 г.

# ОЦЕНКА ПРИЛИВОВ В НОВОМ ПОРТУ (ОБСКАЯ ГУБА) ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ЗА УРОВНЕМ ЗА ПЕРИОД 1977–2012 гг.

д-р геогр. наук Г.Н.ВОЙНОВ<sup>1,2</sup>, канд. техн. наук А.А.ПИСКУН<sup>2</sup>

<sup>1</sup> — ФГБУ Государственный океанографический институт, Санкт-Петербургское отделение, Санкт-Петербург

<sup>2</sup> — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: piskun@aari.ru

Изложены результаты применения способа контроля и коррекции многолетних срочных наблюдений за уровнем моря по наблюдениям в бухте Новый Порт за 1977–2012 гг. Отмечена эффективность метода при оценке качества материалов наблюдений за уровнем моря и приведении временных рядов в базах данных к однородным массивам. С помощью нового способа получены устойчивые оценки составляющих волн приливов в бухте Новый Порт и получен многолетний ход (36 лет) амплитуды и фазы волны  $M_2$ .

*Ключевые слова*: приведение срочных наблюдений к однородным рядам, оценка качества наблюдений, приливы, гармонические постоянные приливов в бухте Новый Порт, сезонный ход волны *M*,, многолетний ход амплитуды и фазы волны *M*, Обская губа.

## введение

Наблюдения за колебаниями уровня в бухте Новый Порт Обской губы были начаты в 20–30-е гг. ХХ в. в связи с описью и съемкой берегов и промерами глубин при производстве гидрографических работ. Эти наблюдения также выполнялись специальными портоизыскательскими экспедициями с целью освоения и развития Северного морского пути. Однако эти измерения производились кратковременными сериями длительностью 15 или 30 суток (в единичных случаях до 2–3 месяцев) только в летний, навигационный период (июль–сентябрь) и носили нерегулярный характер. При этом измерения колебаний уровня моря выполнялись следующими способами: по футштоку (рейке) или по сваям, а с 1970-х гг. с помощью самописца уровня моря СУМ (типа «Валдай») или по мареографу ГМ-28 (гидростатического типа). Эти наблюдения и в настоящее время представляют большую ценность для исследования приливов. Сведения о наблюдениях за колебаниями уровня в Обской губе в целом по 1950 г. приведены в (Коптева, 1953), а результаты обработки приливов гармоническим анализом помещены в справочнике (Коптева и др., 1952).

Регулярные круглогодичные срочные наблюдения за уровнем моря были организованы в бухте Новый Порт с 1977 г. (см. рис. 1). Пост оборудован водомерной рейкой, укрепленной на сваях пирса на расстоянии 100 м от берега при глубине около 2,0 м. С образованием устойчивого припая наблюдения за уровнем моря выполняются по подвесной водомерной рейке в майне с подогревом, расположенной в 200 м к востоку от берега. Пост привязан к Балтийской системе высот. Высотная основа в



Рис. 1. Расположение уровенного поста в Обской губе Карского моря.

районе уровенного поста Новый Порт по состоянию на 2012 г. представлена основным репером (год закладки не установлен) и контрольным (репер Государственной геодезической сети, заложен в 1966 г.).

Оценка качества материалов наблюдений, опубликованных в изданиях Государственного водного кадастра (ЕДМ), и состояния высотной основы поста Новый Порт дана в (Пискун, 2004; 2010; Голованов и др., 2012). При этом качество данных по уровню оценивалось на основе анализа устойчивости высотной основы ряда постов и их сопряженности. Новая методика контроля и коррекции срочных наблюдений за уровнем моря, разработанная в (Войнов, 2009), позволила провести детальный анализ качества этих данных с целью приведения наблюдений к однородным рядам. В табл. 1 приведены все использованные нами материалы ежечасных и срочных данных.

В 2000-е гг. началось освоение шельфа арктических морей. Для гидрометеорологического обеспечения производства работ на шельфе, строительства инженерных сооружений и портов требуются различные оценки и прогнозы колебаний уровня и приливов и результаты статистических расчетов, основанные на данных однородных

#### Таблица 1

Гол	Периол	Дискретность	Продолжительность,	Способ
ТОД	период	измерений, ч	сут.	измерений
1938	01.07-30.09	1	91	Рейка
1939	01.07-25.09	1	87	Рейка
1977	04.08-15.08	1	12	ГМ-28
1979	01.04-30.09	1	206	ГМ-28
1977-2012*	01.01-31.12	6	365 (всего 36 лет)	Рейка

Сведения о ежечасных и срочных наблюдениях за уровнем моря в бухте Новый Порт, использованные в настоящей работе

Примечание. \* — в отдельные годы имеются перерывы в наблюдениях.

наблюдений за уровнем. Без однородных рядов наблюдений невозможны выполнение научно-исследовательских работ и расчет надежных характеристик режима уровня.

Целью данной работы является приведение многолетних рядов срочных наблюдений в бухте Новый Порт за период 1977–2012 гг. к однородным рядам с объективной оценкой качества этих данных на основе методологии, изложенной в (Войнов, 2009). В результате обработки представлены новые достоверные оценки констант волн короткопериодных и долгопериодных приливов, а также получен сезонный ход основных волн приливов и исследована устойчивость амплитуды и фазы (угла положения) волны  $M_2$  в многолетнем плане за период 36 лет.

# МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Обработка ежечасных серий с целью разработки модели прилива. Первая серия ежечасных наблюдений за уровнем моря в Новом Порту за 15 сут была получена в 1921 г. (Стахевич, 1926). Качество наблюдений было невысоким, точность хода часов плохая. Гармонический анализ наблюдений выполнялся по методу Дарвина. Контроль вычислений производился с помощью визуального сравнения наблюдений и предвычисленного ряда. Очевидно, что такой прием позволял выявить только грубые промахи при вычислении основных полусуточных волн, а ошибки расчета суточных волн, имеющих намного меньшие по величине амплитуды, оставались невыявленными. Как следствие этого, в работе (Стахевич, 1926) углы положений суточных волн  $K_1$  и  $O_1$  в бухте Новый Порт даны с ошибками в 180°.

Более продолжительные ежечасные данные о колебаниях уровня в Новом Порту, пригодные к обработке гармоническим анализом, были получены в период экспедиционных работ в июле–сентябре 1938 и 1939 гг. (см. табл. 1). Эти наблюдения за 1938 г. частично были обработаны по методу Дарвина (две серии) и помещены в (Коптева и др., 1952). Как видно из результатов этой обработки, константы основных волн существенно различаются между двумя сериями, что вносит неопределенность в возможность их применения.

В целом причиной малой достоверности исторических результатов гармонического анализа приливов по методу Дарвина, помимо его собственных недостатков, была недостаточная разработанность методологии и плохое качество наблюдений.

Практически все материалы исторических наблюдений (точнее, их копии) сохранились в фондах ААНИИ. Поэтому эти материалы нами были заново обработаны по новой методологии (Войнов, 2011). В пунктах Обской губы была получена сезонная изменчивость основных суточных и полусуточных волн приливов (рассчитаны средние векторные значения гармонических постоянных на каждый месяц года) и определены долгопериодные приливы. В случае наличия нескольких серий наблюдений в отдельном месяце эти оценки определялись как средние векторные значения на данный месяц.

Для ежечасных временных рядов колебаний уровня моря нами разработан способ контроля и редакции случайных выбросов (Войнов, 2011). Контроль по программе временных рядов производился с заданием критерия отклонения более 6 см. Далее ежечасные временные ряды подвергались фильтрации фильтром Д49 нижних частот для подавления влияния непериодических колебаний. С целью устранения срезки при фильтрации (48 значений ряда теряется) временные ряды предварительно дополнялись в начале и конце рядов с помощью предвычисления. Затем по полученным квазиприливным компонентам временных рядов производился гармонический анализ приливов с помощью МНК по методике, разработанной в ААНИИ (Войнов, 2011).

Обработка срочных наблюдений с целью уточнения модели прилива. Срочные наблюдения за 1977–2012 гг. обрабатывались по методике, изложенной в (Войнов, 2009). На первом этапе были составлены отдельные таблицы с результатами месячных и годовых анализов по волнам  $M_2$ ,  $N_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ . По каждому месяцу имелись ряды амплитуд и фаз этих волн за 36 лет. Затем были рассчитаны средние векторные значения этих волн для каждого месяца года. При этом отбрасывались аномальные выскакивающие значения. Предварительная информация о средних месячных константах волн, включая волны  $S_2$  и ряд мелководных волн, а именно:  $M_4$ ,  $MS_4$ ,  $M_6$ , была получена ранее из ежечасных наблюдений за апрель–сентябрь. При формировании списков средних месячных значений констант суточных волн  $K_1$  и  $O_1$  для зимнего периода, где амплитуды этих волн не выше 0,5 см, мы использовали в качестве реперных (опорных) значений характер и степень сезонного хода волн у м. Каменный.

Приведение срочных наблюдений к однородным рядам. Уже по предварительным результатам гармонического анализа приливов стало ясно, что наблюдения не только в ряде месяцев отдельных лет, но и в целом за ряд лет в конце 1980-х и в 1990-е гг. имеют неудовлетворительное качество и непригодны для оценки приливов, исследования непериодических колебаний уровня и вообще проведения каких-либо статистических расчетов. Мы здесь не будем обсуждать причины низкого качества наблюдений, они известны (Комчатов и др., 2011; Войнов, 2015).

Методология приведения срочных наблюдений к однородным рядам с помощью ревизии квазиприливной компоненты, выделенной из данных с помощью фильтра низких частот, и квазиприливной компоненты предвычисленного ряда, также полученного по такому же фильтру, как и значения весовой характеристики этого фильтра, приведены в (Войнов, 2009). В этой же работе обращено внимание на выбор критерия — допустимого расхождения в значениях на любой срок между квазиприливными компонентами наблюдений и предвычислений. Понятно, что от величины критерия зависит степень коррекции данных срочных наблюдений.

Были испытаны разные подходы к выбору критерия. Возможно применение статистических оценок, например, в качестве критерия можно использовать среднее квадратическое отклонение за текущий месяц, полученное по квазиприливной компоненте предвычисленного ряда. Более надежен эмпирический подход. Критерий априори должен быть установлен максимальным по величине (будет меньше исправлений), но при этом он должен быть таким, чтобы восстановить близкий к среднему (норме) сезонный ход прилива в конкретном году в летний (июль–сентябрь) и зимний (октябрь–июнь) периоды.

Для годовых серий с хорошим качеством (сезонный ход волн близок к норме) устанавливался критерий для зимнего периода 5 см, а для летнего периода 14 см. Для годовых серий с низким качеством наблюдений критерий составлял соответственно 4 см и 10 см. Для показательного случая нами было выбрано два месяца срочных наблюдений за август за разные годы с хорошим и плохим качеством наблюдений, которые представлены соответственно на рис. 2 и 3.

Из кривых рис. 2 видно, что квазиприливные компоненты наблюдений и предвычислений (прилива) почти полностью идентичны между собой. По результатам



Рис. 2. Временной ход высоты срочных колебаний уровня моря в бухте Новый Порт в августе 1979 г. по данным наблюдений (*a*), квазиприливной компоненте наблюдений (*б*), квазиприливной компоненте прилива (*в*). По оси ординат — шкала времени с дискретностью 6 ч (31 сут. — 124 единицы шкалы).



Рис. 3. Временной ход высоты срочных колебаний уровня моря в бухте Новый Порт в августе 1998 г. по данным наблюдений (*a*), квазиприливной компоненте наблюдений (*б*), квазиприливной компоненте прилива (*в*). По оси ординат — шкала времени с дискретностью 6 ч (31 сут. — 124 единицы шкалы).

анализа по МНК амплитуда и фаза волны  $M_2$  в августе 1979 г. были равны соответственно 15,13 см и 61° (при норме 14,45 см и 66°). При применении критерия 14 см только 4 значения из 124 сроков за месяц подлежат коррекции. Замены вносятся в исходный и квазиприливный ряды.

На рис. 3 представлен случай наблюдений низкого качества. Даже по виду кривой наблюдений очевидно, что ход приливных колебаний уровня сильно нарушен. По результатам анализа по МНК амплитуда и фаза волны  $M_2$  в августе 1998 г. были равны соответственно 7,28 см и 56°. Из сопоставления кривых квазиприливных компонент наблюдений и предвычислений (см. рис. 3) следует, что здесь были пропущены не отдельные сроки (как на рис. 2), а уже полные сутки. Таких значений всего было 49 (или около 12 сут. в целом) при критерии 10 см. После внесения коррекции значения волны  $M_2$  стали 13,44 см и 69°. Но если бы был применен критерий 14 см, то значения волны  $M_3$  были бы 11,14 см и 69°, что существенно отклоняется от нормы по амплитуде.

В результате коррекции срочных наблюдений изменения вносятся в диапазоне мезомасштабных колебаний уровня (точнее — на периодах менее 1,7 сут.), а колебания в масштабе многолетней и синоптической изменчивости остаются без изменений. Причем в спектре мезомасштабных колебаний мы вносим коррекцию только в приливный сигнал, а непериодические колебания на периодах от 2 ч до примерно 29 ч в большинстве случаев срезаются. Подобные колебания можно сохранить только при визуальной ревизии рядов (что является громоздкой ручной процедурой) и наличии в сомнительных случаях синхронных наблюдений на близлежащих станциях (в нашем случае м. Каменный).

Однако перспективы опоры на синхронные ряды плохие. В срочных наблюдениях на м. Каменный за 1980–1990-е гг. нами обнаружены те же самые проблемы с качеством данных, которые отмечены в Новом Порту (см. табл. 6).

Методика обработки и анализа долгопериодных приливов. Для выделения этого класса приливов использовались среднесуточные значения уровня за весь период наблюдений (на первом этапе за 1977–1988 гг., затем после коррекции срочных данных за период 1977–2012 гг.). Применялась методика, изложенная в (Войнов, 2002). В долгопериодном классе 6 волн (Mn, Sa, Ssa, Sta, Msf, Mf) превысили 95-процентный доверительный интервал. При этом годовая, полугодовая и третьгодовая гармоники описывают сезонный ход уровня моря.

В первом приближении по полученным константам прилива на каждый месяц были предвычислены годовые ряды на несколько лет, и по ним был произведен гармонический анализ по МНК с выделением волн, описывающих сезонную изменчивость основных суточных и полусуточных волн прилива (Войнов, 2011). Однако расчеты по полученной модели прилива показали недостаточно точное описание сезонного хода волны  $M_2$  в месяцы очень резкого изменения амплитуд и фаз. Это пока единственный обнаруженный нами случай неполной адекватности описания временного хода предвичисленного прилива с помощью сложных волн и реального среднего сезонного хода волны  $M_2$  по месяцам года. По существу обнаруженное нами явление тождественно явлению Гиббса в Фурье-анализе.

Поэтому в дальнейшем для контроля и коррекции срочных наблюдений была разработана программа предвычисления прилива в Новом Порту по спискам констант волн для каждого месяца года. В эти списки были включены долгопериодные приливы. Эта же программа использовалась для заполнения пропусков в отдельных годах.

# РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ПРИЛИВОВ

По результатам анализа ежечасных серий получены новые оценки гармонических постоянных волн в бухте Новый Порт для летнего периода. Здесь приведены эти оценки только для августа. Рамки настоящей работы не позволяют привести оценки приливов для остальных месяцев года.

Из табл. 2 следует, что характер прилива в августе в Новом Порту полусуточный с выраженным влиянием мелководных волн прилива. Другие выводы по результатам анализа будут даны ниже. Главной особенностью поведения прилива является резко выраженный сезонный ход.

Таблица 2

Волия	Угловая скорость,	Амп	литуда	Угол положения		
Болна	град/ч	Н	± с.к.о.	g	± с.к.о.	
$Q_1$	13,398661	0,73	0,22	119	18	
$O_1$	13,943035	0,95	0,32	326	20	
$P_1$	14,958931	0,79	0,10	136	8	
$K_1$	15,041068	2,40	0,32	136	8	
$MNS_2$	27,423834	0,44	0,20	120	26	
$2N_2$	27,895354	0,59	0,33	97	32	
μ,	27,968208	0,72	0,40	97	32	
$N_2$	28,439729	2,19	0,17	15	5	
$v_2$	28,512583	0,42	0,03	15	5	
М,	28,984104	13,45	0,46	71	2	
$L_{2}$	29,528479	1,36	0,46	113	20	
$\tilde{T_2}$	29,958933	0,28	0,02	159	4	
$\overline{S_2}$	30,000000	4,78	0,36	159	4	
K <sub>2</sub>	30,041067	1,30	0,09	159	4	
$MSN_2$	30,511375	0,25	0,14	270	32	
$2SM_2$	31,015896	0,51	0,36	71	41	
$MO_3$	42,927140	0,31	0,14	154	27	
$MK_3$	44,025173	0,25	0,13	182	30	
$MN_4$	57,423834	0,27	0,08	351	18	
$M_4$	57,968208	1,71	0,31	71	10	
$SN_4$	58,439729	0,19	0,16	196	48	
$MS_4$	58,984104	1,38	0,22	166	10	
$S_4$	60,000000	0,19	0,12	296	38	
$M_6$	86,952313	0,24	0,05	98	13	
$2MS_6$	87,968208	0,29	0,02	163	5	
$M_8$	115,936417	0,07	0,05	291	44	

Результаты анализа наблюдений за приливами в бухте Новый Порт за август

Примечания. 1. Приведены волны с амплитудой, превышающей одно с.к.о. в данной частотной полосе прилива. 2. Волны  $P_1$ ,  $K_2$ ,  $N_2$  и  $v_2$  даны во втором приближении по известным теоретическим соотношениям. 3. Для всех волн для расчета нодальных параметров учитывались только составляющие волн от второго члена потенциала (приливов второй степени) по Картрайту (Дудсону). 4. H — амплитуда, см; g — угол положения, град., с.к.о. — значения среднего квадратического отклонения (векторного). 5. Средние векторные оценки рассчитаны по результатам анализа ежечасных месячных серий за 1938, 1939, 1979 гг. Углы положений приведены к нулевому поясу.

Явление сезонной изменчивости приливов в Обской губе было обнаружено в работе (Коптева, 1953). Приведенные в этой работе результаты в общем были ориентировочными, предварительными оценками и не везде были достоверными. Полученные в нашей работе новые оценки позволяют провести ревизию ранних оценок и взглядов.

В целом явление сезонного хода прилива практически полностью связано с развитием припайного льда. Имеется прямая корреляция между сезонным ходом амплитуд и фаз основных волн прилива и развитием припайного льда. Ранее это было установлено в пунктах, где имелись круглогодичные измерения уровня, — в Тамбее, Сеяхе, Тадибеяхе, Каменном. В Новом Порту эти данные до 1977 г. отсутствовали. Поведение прилива в зимний период ранее было неизвестно.

Влияние ледяного покрова на характеристики прилива. Прежде всего уточним общие черты распространения прилива в летний и зимний периоды. В табл. 3 даны оценки времени движения волны прилива  $M_2$  для зимы и лета по данным, полученных в нашей работе. При расчете были использованы котидальные карты волны  $M_2$  для летнего (август) и зимнего (апрель) периодов, построенные нами по результатам обработки исторических и современных данных наблюдений. Расстояние отсчитывалось от изолинии 270° (август), расположенной по линии м. Дровяной — о. Шокальского, по срединной линии Обской губы и составило 530 км до м. Каменный и 660 км до бухты Новый Порт. Изменение фаз бралось суммарное по пунктам вдоль западного берега Обской губы и было равно 401° и 521° для августа и 494° и 655° для апреля соответственно для м. Каменный и б. Новый Порт.

Таблица 3

# Время движения прилива волны M<sub>2</sub> для зимнего и летнего периода в пунктах Обской губы

Пункт	Время, <i>t</i> (ч), лето (август)	Время, <i>t</i> (ч), зима (апрель)	Разность (запаздывание), $\Delta t$	
Каменный	13,8	17,0	3,2	
Новый Порт	18,0	22,6	4,6	

В целом по данным табл. 3 видно, что в августе волна прилива проходит Обскую губу от морского участка (м. Дровяной) до Нового Порта за 18 ч, а в апреле к Новому Порту волна приходит позже на 4,6 ч.

В табл. 4 приведены значения характера прилива, величин отношения амплитуд волн  $S_2/M_2$  и волн  $M_4/M_2$  для лета (август) и зимы (апрель) в двух пунктах Обской губы. *Таблица 4* 

Значения характера прилива, величин отношения амплитуд вол<br/>н $S_2/M_2$ и волн $M_4/M_2$ для лета (август) и зимы (апрель) в пунктах Обской губы

Пункт	$(H_{\rm K_1} + H_{\rm O_1})/(H_{\rm M_2} + H_{\rm S_2})^*$		$H_{{\rm S}_2}/H_{_{M_2}}$		$H_{M_4}/H_{M_2}$	
	Август	Апрель	Август	Апрель	Август	Апрель
Каменный	0,176	0,213	0,369	0,391	0,138	0,09
Новый Порт	0,184	0,536	0,355	0,533	0,127	0,08
- *			0.05 . 1	-		

*Примечание.* \* — при значении отношения > 0,25 и < 1,50 прилив смешанный, в основном полусуточный.

В качестве критерия характера (формы) прилива использован критерий Куртье, так как критерий Дуванина в силу неполноты (нет волны  $S_2$ ) для наших данных дает в ряде случаев неверные определения формы прилива. Из этой таблицы видно, что

в зимний период значение критерия возрастает и характер прилива меняется. То есть в летний период прилив носит полусуточный характер, а в зимний период в Новом Порту происходит переход к смешанному виду с преобладанием полусуточного характера.

Во временном ходе приливных колебаний уровня наиболее выражено фазовое неравенство приливов. Величина отношения амплитуд волн  $H_{S_2}/H_{M_2}$ , отвечающая за ход фазового неравенства прилива (цикл сизигия–квадратура), также существенно различается в летний и зимний периоды. В зимний период (в апреле) величина отношения увеличивается. Это означает, что в этих пунктах изменчивость прилива в цикле сизигия–квадратура становится более выраженной в зимний период по сравнению с летним.

Наконец, величина отношения мелководных волн  $H_{M_4}/H_{M_2}$  демонстрирует поведение кривой прилива и отвечает за продолжительность времени падения и времени роста прилива. Наиболее выражены мелководные волны в летний период, когда их величина для основных волн  $M_4$  и  $M_{S_4}$  достигает в Новом Порту около 1,7 см и 1,4 см (для м. Каменный соответствующие значения достигают 3 см). В зимний период наблюдается очень сильное гашение амплитуд мелководных волн и их амплитуда для отдельной волны не превышает 0,1 см. Такое поведение отражается на значениях критерия  $H_{M_4}/H_{M_2}$  (см. табл. 4), который в зимний период более чем на порядок меньше, чем в летний период.

Мелководный прилив с периодом 4 ч не играет заметной роли в описании кривой прилива, так как по величине волна  $M_6$  даже в летний период не превышает 0,2 см. В зимний период его амплитуда падает в разы и он практически полностью затухает.

Таким образом, наши данные подтверждают теоретические положения о влиянии ледяного покрова на спектр волн прилива в зависимости от периода волны (Крылов, 1948; Максимов, 1953). Волны под ледяным покровом гасятся тем сильнее, чем короче период (длина) волны. В наименьшей степени трансформируются суточные волны, и в наибольшей степени мелководные волны. Это касается всех характеристик или параметров прилива: распространения амплитуд и фаз конкретной волны прилива, ее характера и всех производных величин.

Сезонная изменчивость волны  $M_2$  по срочным наблюдениям. Результаты гармонического анализа месячных серий наблюдений за уровнем моря позволили выявить среднюю сезонную изменчивость гармонических постоянных основных волн прилива. Для получения устойчивых оценок этой изменчивости необходимы регулярные многолетние и, предпочтительно, ежечасные наблюдения за уровнем моря. Для пункта Новый Порт были использованы скорректированные ряды срочных наблюдений за период 19 лет с 1977 по 1995 г.

Сезонный ход амплитуды представлен также в виде относительного изменения (dH) ее средней величины (H) как  $dH = (H_{\rm M} - H_{\rm r}) / H_{\rm r}$  (%), где H с индексом «м» — среднее векторное значение из всех серий за данный месяц, а с индексом «г» — среднее векторное за весь период. Сезонный ход фазы (dg) дан в виде отклонения средней величины из всех серий за данный месяц от средней за весь период  $dg = (g_{\rm M} - g_{\rm r})$ . Среднее квадратическое отклонение (с.к.о., или  $\sigma$ ) для амплитуды и фазы рассчитывались по формулам ошибок векторного среднего. Для этого средняя и индивидуальные месячные значения амплитуды и фазы преобразовывались в компоненты  $H \cdot \cos g$  и  $H \cdot \sin g$ . По ним рассчитывалась стандартная ошибка для амплитуды  $\sigma_{H}$  и затем для фазы  $\sigma_{g}$ :

59

 $\sigma_{H} = [\sigma_{A}^{2} (\cos g)^{2} + \sigma_{B}^{2} (\sin g)^{2}]^{1/2}, \sigma_{g} = \sigma_{H}/H, \qquad (1)$ где  $\sigma_{A}$  — с.к.о. для компоненты H-cosg, а  $\sigma_{B}$  — с.к.о. для компоненты H-sing;  $H = \{(H \cdot \cos g)^{2} + (H \cdot \sin g)^{2}\}^{-1}, \operatorname{tg}(g) = (H \cdot \sin g)/(H \cdot \cos g).$ 

Таблица 5

Мооли	Средни	е оценки	Сезонный ход			
месяц	<i>H</i> , см	<i>G</i> , град	dH, %	<i>dg</i> , град		
Ι	0,82	86,3	-77,4	11,4		
II	0,66	136,7	-81,9	61,8		
III	0,47	171,9	-87,1	97,0		
IV	1,05	229,4	-71,2	154,5		
V	1,29	222,9	-64,4	148,0		
VI	0,97	88,0	-73,2	13,0		
VII	13,06	75,3	259,5	0,3		
VIII	14,45	66,2	297,8	-8,7		
IX	11,72	70,0	222,8	-4,9		
Х	2,27	79,1	-37,4	4,1		
XI	1,51	84,3	-58,3	9,3		
XII	0,85	85,6	-76,5	10,7		

Оценки средних значений амплитуд (*H*) и фаз (*g*) волны *M*<sub>2</sub> (в нулевом поясе) и их сезонный ход в бухте Новый Порт за период 1977–1995 гг.

По формуле (1) были получены средние месячные оценки и их изменения от месяца к месяцу в годовом цикле. Эти оценки для волны  $M_2$  даны в табл. 5.

Согласно классификации кривых сезонного хода констант полусуточных волн прилива в арктических морях (Войнов, 2011), в Новом Порту наблюдается классический тип с выраженным максимумом амплитуды в августе и минимумом фазы в этот же месяц (см. табл. 5).

Таблица 5 демонстрирует предельный аномальный вид сезонной изменчивости прилива. В зимний период — с октября и по июнь — прилив практически не выражен, в апреле амплитуда волны  $M_2$  равна 1,0 см, а средняя сизигийная величина прилива равна 3,3 см. Сразу же после взлома припая в начале июля прилив становится выраженным, достигает максимума в августе (в среднем), когда амплитуда волны  $M_2$ равна 14,4 см, а средняя сизигийная величина равна 36 см и скачкообразно гасится где-то в середине октября при становлении припайного льда. Таким образом, в зимний период амплитуда волны и в целом величина прилива на порядок меньше, чем в летний период. Размах изменения фазы волны  $M_2$  между апрелем и августом достигает 163°. Для м. Каменный, расположенного в 130 км к северу, изменение фазы между апрелем и августом в среднем равно 98°, а изменение величины прилива в зимний период происходит предположительно в районе м. Виткова.

Сезонный ход амплитуды и фазы волн полусуточных приливов  $S_2$  и  $N_2$  в общих чертах соответствует таковому у волны  $M_2$ . В большей степени подобие кривых хода амплитуды и фазы и сезонного хода их изменений в годовом цикле наблюдается для волны  $S_2$  и в меньшей степени для волны  $N_2$ . В целом максимум амплитуд и их относительных значений отмечается в августе, и также минимум фаз и их отклонений от средних годовых значений наступает в этот же месяц. Причина имеющихся расхождений, на наш взгляд, обусловлена случайными отклонениями и большим разбросом вследствие малых значений амплитуд этих приливов, в особенности в зимний период.

Сезонная изменчивость суточных волн  $K_1$  и  $O_1$  по наблюдениям. Кривые сезонного хода значений относительных амплитуд и значений отклонений фаз от средних в годовом цикле выражены не так четко, как для полусуточных волн. Во-первых, не наблюдается такой же однозначности результатов, как для полусуточных волн. Это становится понятным, если принять во внимание величины амплитуд волн этих приливов и величины разброса средних оценок за каждый месяц. Качество имеющихся наблюдений не позволяет получить устойчивые оценки волн с амплитудой около 0,5 см для зимнего периода.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНОК КАЧЕСТВА НАБЛЮДЕНИЙ В БУХТЕ НОВЫЙ ПОРТ ЗА ПЕРИОД 1977–2012 гг.

В качестве критерия качества наблюдений использовано общее число замен сомнительных значений (брака) в году. В качестве прямого показателя качества дана также средняя за год амплитуда и фаза (угол положения) волны  $M_2$ . Средняя многолетняя (норма) за период анализа 1977–1988 гг. составила по амплитуде 3,75 см и по фазе 76,5°. Трудно интерпретировать физический смысл этой величины для условий аномальной изменчивости прилива, но приближенно она близка к средней векторной за 12 месяцев по данным табл. 5. То есть основной вклад в результирующую величину вносит прилив в летний период. Поэтому при большом количестве брака даже в одном месяце в летнем периоде средняя за год амплитуда волны  $M_2$  занижается.

Ранее при производстве гармонического анализа в пунктах Карского моря средняя фаза волны  $M_2$  за год и ее изменения как внутри года (сезонный ход), так и между годами (многолетний ход) служили индикатором постоянства времени измерений (Войнов, 2009). В условиях аномального сезонного хода и низкого качества наблюдений в Новом Порту эта функция становится невозможной (см. табл. 6).

Из табл. 6 видно, что резкое ухудшение качества наблюдений произошло в 1989 г. Небольшое относительное улучшение, казалось, произошло в 1990–1992 гг. Однако в эти годы отмечалось уменьшение величины прилива в летний период и в целом за год, что, конечно, не являлось природным явлением. Несмотря на относительно небольшие количества замен в годах с 1977 по 1988-й (в сравнении с периодом с 1989 по 2003 г.), нельзя признать хорошими наблюдения в 1977–1978 гг., 1982–1983 г. и в 1987 г. Амплитуда волны  $M_2$  в эти годы была существенно ниже нормы, а фаза варьировала в необъяснимых природными явлениями пределах. С 1989 по 2003 г. продолжалось еще более сильное падение амплитуды волны  $M_2$  с полностью нереальными колебаниями фазы между годами.

С 2004 по 2011 г. качество наблюдений существенно улучшилось, и именно в этот период стали снова отмечаться перерывы в наблюдениях, что вполне естественно для периодов разрушения и становления припайного льда. К сожалению, в 2012 г. качество наблюдений вновь резко снизилось.

По данным табл. 6 видно, что с 2005 г. отмечается рост фазы волны  $M_2$ , амплитуда также несколько увеличивается в сравнении с нормой. В отсутствие дополнительной информации об условиях наблюдений, было бы преждевременно давать этому явлению какую-либо оценку.

Результаты оценки качества срочных наблюдений, представленные в табл. 6, не внушают оптимизма. Они отражают экономические и иные процессы, проис-

#### Таблица б

Год	1	2	Н	g	Год	1	2	Н	g
1977	31,5	68,4	<u>1,94</u>	67	1995	59,4	59,4	0,62	35
1978	29,3	36,7	<u>2,07</u>	49	1996	58,1	58,1	<u>1,63</u>	121
1979	20,1	20,1	2,97	75	1997	67,7	67,7	<u>1,10</u>	80
1980	28,3	32,2	3,22	86	1998	62,3	62,3	<u>1,50</u>	45
1981	4,5	4,5	2,91	89	1999	61,2	61,2	<u>1,05</u>	22
1982	34,0	35,6	<u>2,03</u>	82	2000	63,8	63,8	<u>0,55</u>	300
1983	30,4	33,3	<u>2,77</u>	54	2001	61,6	61,6	<u>1,04</u>	80
1984	16,5	39,2	3,85	60	2002	71,7	71,7	<u>0,69</u>	41
1985	33,3	69,4	3,64	67	2003	73,3	73,3	<u>1,14</u>	6
1986	32,8	32,8	3,16	59	2004	50,9(41,8)	77,3	4,61	78
1987	40,8	40,8	<u>2,31</u>	75	2005	35,5	42,0	5,14	97
1988	39,2	39,2	3,14	85	2006	33,4	43,3	3,99	99
1989	50,1	50,1	<u>2,02</u>	103	2007	39,4	46,6	3,12	108
1990	32,6	32,6	<u>2,55</u>	77	2008	33,3	43,3	3,79	111
1991	32,0	32,0	<u>0,42</u>	158	2009	34,3	39,0	4,07	110
1992	39,0	39,0	<u>2,05</u>	84	2010	36,1	42,8	4,51	125
1993	43,8	43,8	<u>0,74</u>	85	2011	33,4	47,8	4,89	109
1994	59,0	59,0	<u>1,74</u>	67	2012	64,4	72,3	1,38	95

Распределение количества случаев брака и в целом брака и пропусков в исходных рядах уровня в Новом Порту за 1977–2012 гг. (в процентах длины ряда)

Примечания: 1 — количество брака (замен, сомнительных значений) в наблюдениях; 2 — общий процент пропусков и брака за год, H — средние за год значения амплитуды (см), g — фаза (угол положения) волны  $M_2$  (в градусах по нулевому поясу). Жирным шрифтом выделены самые некачественные данные. Подчеркнуты аномально заниженные значения амплитуды. Для 2004 г. в скобках даны сведения за август–декабрь.

ходившие в конце XX и начале XXI в. на уровенных пунктах. Обратим внимание, что наша методология позволяет обнаружить недостатки в материалах наблюдений, которые невозможно обнаружить традиционными методами, рекомендованными наставлением (Наставление, 1984) при проведении экспертизы материалов публикуемой части Водного кадастра.

# МНОГОЛЕТНИЙ ХОД АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ (УГЛА ПОЛОЖЕНИЯ) ВОЛНЫ $M_{\rm 2}$ ЗА АВГУСТ С 1977 ПО 2012 г.

Устойчивость констант составляющих волн прилива (гармонических постоянных) является одной из главных проблем океанологии. Все данные, опубликованные в Таблицах приливов, как правило, получены в XX в. или даже раньше. Всегда остается неясным вопрос: насколько достоверны и неизменны эти данные. Отражаются ли изменения глобального уровня в Мировом океане и изменения в площади ледяного покрова в СЛО в последние десятилетия на формировании и распространении приливов? Для ответа на этот вопрос требуются многолетние ряды наблюдений за уровнем моря. В Обской губе Карского моря наблюдения за уровнем моря на всех станциях, кроме бухты Новый Порт, были прекращены в начале 1990-х гг. Поэтому многолетние результаты гармонического анализа прилива в Новом Порту являются единственными в этом плане и представляют несомненный интерес.



Рис. 4. Временной ход амплитуды и угла положения волны $M_{\rm _2}$ в августе в бухте Новый Порт.

Средние годовые оценки даже волны  $M_2$  после коррекции все же не обладают необходимой устойчивостью во времени вследствие очень большого разброса в результатах анализа по исходным данным (см. табл. 6). Гораздо более устойчивые оценки волны  $M_2$  наблюдаются в средних месячных результатах анализа за август. Именно эти значения использованы для изучения многолетней изменчивости констант прилива и представлены на рис. 4.

Во временном ходе амплитуды волны  $M_2$  можно видеть незначительную тенденцию к уменьшению амплитуды в конце ряда (в 2004–2011 гг.) в сравнении с периодом 1977–1992 гг., но здесь может сказываться влияние низкого качества наблюдений в 1993–2003 гг., которое было не полностью устранено коррекцией рядов и привело к занижению значений амплитуды. В многолетнем ходе угла положения заметно увеличение фазы с 2007 г. В настоящее время без знания условий наблюдений на станции еще нельзя делать вывод о достоверности этого явления. Зачастую подобные изменения фазы объясняются или изменением времени наблюдений, и/или не строгим выдерживанием времени сроков, что характерно для всех уровенных пунктов, где ведутся срочные наблюдения (Войнов, 2009).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ позволил вскрыть недостатки в данных по уровням воды, которые появились вследствие несоблюдения наставлений по производству наблюдений. Их, как правило, не удается обнаружить традиционными методами, изложенными в наставлении применительно к экспертизе публикуемой части Водного кадастра (среднесуточных уровней). Установить такие нарушения позволяет лишь углубленная экспертиза с помощью приведенной здесь методики при условии наличия материалов непубликуемой части Водного кадастра (ежечасных и срочных данных наблюдений).

Применение новой методики позволило дать объективную оценку качества наблюдений и привести временные ряды срочных наблюдений к однородным рядам. В результате были получены надежные оценки короткопериодных приливов на каждый месяц года и оценки долгопериодных приливов за весь период наблюдений. Впервые даны характеристики прилива в зимний период года и установлена различная степень гашения волн разных классов (и периодов) под припаем. В наименьшей степени припай оказывает влияние на волны суточного периода и в наибольшей степени — на мелководные волны высших классов с периодом 4 и 6 ч, которые в зимний период практически исчезают. Впервые установлен вид многолетней изменчивости констант основных волн прилива за период 36 лет. В частности, обнаружен тренд во временном ходе амплитуды волны  $M_2$  с 2004 г. (в сторону уменьшения значений) и тренд угла положения с 2007 г. (в сторону возрастания величины). Однако значимость оценок тренда в настоящее время не может быть надежно установлена вследствие низкого качества наблюдений. Необходима постановка дополнительных ежечасных наблюдений за уровнем моря для подтверждения полученных результатов.

Можно констатировать, что программа наблюдений за уровнем моря, реализуемая в настоящее время на полярных станциях в виде срочных измерений по футштоку, безнадежно устарела со всех точек зрения и не обеспечивает задачу мониторинга арктических морей. Назрела необходимость технического переоснащения постов современными автономными измерительными комплексами с непрерывной регистрацией колебаний уровня моря.

Необходимо также приступить к качественному обновлению высотной основы постов, что означает переход к реперам более высокого класса и надежности с привязкой их к высокоточной геоцентрической системе координат с использованием спутниковых систем позиционирования GPS/ГЛОНАСС.

Авторѕ выражает признательность Л.А. Тимохову за полезные замечания, позволившие улучшить содержание работы.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Войнов Г.Н. Гармонический анализ долгопериодных приливов по срочным наблюдениям и среднесуточным значениям уровня моря // Метеорология и гидрология. 2002. № 4. С. 50–58.

Войнов Г.Н. Гармонический анализ морских приливов по срочным наблюдениям за уровнем моря // Метеорология и гидрология. 2009. № 7. С. 79–91.

Войнов Г.Н. Методика контроля и редакции многолетних временных рядов уровня моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 4 (90). С. 51–61.

Г.Н. Войнов. Способ приведения ежечасных наблюдений за уровнем моря к однородным рядам с помощью калибровки приливов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 2 (104). С. 68–80.

Голованов О.Ф., Пискун А.А., Терехова Р.А. Состояние высотной основы гидрологической сети севера ЯНАО // Российские полярные исследования. 2012. № 4 (10). С. 38–41.

Гидрологический ежегодник. 1965 г. Новосибирск: Западно-Сибирское Управление гидрометеорологической службы, 1968. Т. 6. Вып. 0–3. 476 с.

*Комчатов В.Ф., Лучков В.П.* Вековая морская береговая гидрометеорологическая сеть — основа изучения гидрологического режима шельфовой зоны морей РФ и обеспечения гидрометеорологической безопасности // Тр. ГОИН. 2011. Вып. 213. С. 5–14.

Коптева А.В., Бутенко А.К., Иванова З.К. Материалы по изучению приливов Арктических морей СССР // Тр. АНИИ. 1952. Т. 42. Вып. 7. 536 с.

Коптева А.В. Уровень и течения Обской губы // Тр. АНИИ. 1953. Т. 59. С. 84–148.

*Крылов Ю.М.* Распространение длинных волн под ледяным полем // Труды ГОИН. 1948. Вып. 8 (20). С. 107–111.

*Максимов И.В.* О зависимости элементов прилива от ледяного покрва моря // Ученые записки ВАМУ им. С.О. Макарова. 1953. Вып. IV. С. 115–129.

Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 9. Ч. І. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 312 с.

Пискун А.А. Качество многолетних данных по уровням на стационарной сети наблюдений в Обской и Тазовской губах // Тр. ААНИИ. 2004. Т. 449. С. 307–322.

Пискун А.А. Состояние высотной основы и качество данных по уровням воды в Обско-Тазовской устьевой области // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 3 (86). С. 97–113.

*Стахевич В.С.* Данные о приливах в устьях рек Енисея и Оби // Записки по гидрографии. 1926. Т. 51. С. 95–102.

# G.N. VOINOV, A.A. PISKUN

# THE VALUATION OF THE TIDES IN THE NEW PORT (THE GULF OF OB) ON THE SEA LEVEL DATA THE SPAN OF 1977–2012 YEARS

The results of treatment and correction of long-term data in the New Port sea level records are stated. Efficiency of a method at an assessment of quality of materials of long-term sea level records and reduction of time series in databases to uniform massifs is noted. By means of a new method steady estimates of the harmonic constants of the constituents in the New Port of sea level records are received.

*Keywords:* tides, tidal analysis, the seasonal variation in the  $M_2$  tide, the trends of the  $M_2$  tide, the Gulf of Ob, station New Port, sea level dataset.

УДК 551.4.075

Поступила 20 июня 2015 г.

№ 3 (105)

# ПОГРЕБЕННАЯ ПАЛЕОДОЛИННАЯ СЕТЬ ЧУКОТСКОГО ШЕЛЬФА

инженер Е.А. ЗЫКОВ, канд. геол.-минерал. наук Е.А. ГУСЕВ

ФГУП «ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга», Санкт-Петербург, e-mail: evgenmcmillan@gmail.com, gus-evgeny@yandex.ru,

В пределах Чукотского шельфа выявлена сеть плиоцен-четвертичных погребенных палеодолин. Они имеют преимущественно северо-западное простирание и характеризуют направление речного стока во время регрессий моря. Положение и направление погребенных палеодолин отличаются от подводных долин, выраженных в современном рельефе дна. Погребенные палеодолины прерывисто прослеживаются до современных 100-метровых глубинных отметок. В пределах палеодолин зафиксированы переуглубления, образование которых, возможно, связано с неотектоническими процессами, осложнившими структуру древней речной сети.

*Ключевые слова:* Чукотское море, погребенные палеодолины, Берингия, сейсмоакустические исследования.

# введение

Мелководный шельф Чукотского моря в периоды регрессий становился частью древней материковой суши, известной как Берингия. При этом прерывалось сообщение водных масс Тихого и Северного Ледовитого океанов. В расшифровке истории позднекайнозойского осадконакопления Чукотского шельфа важную роль играет определение периодов раскрытия и закрытия Берингова пролива. Таких этапов, по всей видимости, было несколько, а самое первое соединение вод Северной Пацифики и Северного Ледовитого океана произошло в позднем миоцене — плиоцене (Гладенков, Гладенков, 2004; Петров, 1976; Полякова, 1997; Свиточ, Талденкова, 1994; Hokins, 1959). К востоку от Чукотского моря, в районе дельты Маккензи, выделяется поверхность несогласия, следящаяся от гор Ричардсона на суше в область шельфа и континентального склона. Ее образование связано, по всей видимости, с периодом низкого стояния уровня моря от позднего миоцена до раннего плиоцена (McNeil et al., 2001). Последнее, окончательное соединение вод Северного Ледовитого и Тихого океанов произошло около 10,5 тыс. лет назад (Elias et al., 1997). Периоды регрессий характеризовались интенсивным речным врезом в пределах осушенного шельфа. Палеодолины, заполненные древним аллювием и перекрытые четвертичными морскими осадками, легко идентифицируются по данным сейсмоакустического профилирования. Попытка стратиграфической привязки сейсмоакустических горизонтов, выделяемых на профилях в восточной (американской) части Чукотского шельфа внутри плиоцен-четвертичной толщи, выше коренных пород мела, предпринята совсем недавно (Hill, Driscoll, 2008; 2010; Hill et al., 2007; Keigwin et al., 2006). Однако возраст нижних сейсмоакустических комплексов определен предположительно из-за недостаточной глубины проникновения грунтовых трубок, позволяющих произвести

66

непосредственное изучение вещественного состава, биостратиграфических и изотопных характеристик осадков. Бурение, проведенное силами ВНИИОкеангеология в 2006 г. в проливе Лонга, показало, что голоценовые морские илы несогласно перекрывают песчано-алевритовые отложения плиоцена — эоплейстоцена (Gusev et al., 2009).

Целью данной работы являлась реконструкция погребной речной сети на шельфе Чукотского моря по накопленным к настоящему времени сейсмоакустическим профилям.

# МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В статье использованы материалы сейсмоакустических исследований разных лет, полученные по шельфу Чукотского моря. Верхняя часть осадочного чехла исследовалась с помощью спаркера и бумера в 1960–1980-е гг. (Павлидис, 1982; Creager, McManus, 1965; Grantz et al., 1978; Phillips et al., 1988), затем в 2005 г. с применением высокочастотной сейсмоакустики (Hill, Driscoll, 2008; 2010; Hill et al., 2007). В 2006 г. нами при геологической съемке шельфа масштаба 1:1 000 000 использовались спаркер и гидролокатор бокового обзора, совмещенный с гидроакустическим профилографом



Рис. 1. Батиметрическая карта Чукотского шельфа: *I* — бровка шельфа; *ЖГ* — желоб Геральда; *КГ* — Колючинская губа.

(Gusev et al., 2009). Суммарная протяженность сейсмоакустических профилей, использованных нами для построений, составила около 5000 км, треть этого количества представлена собственными данными ВНИИОкеангеология.

Интерпретация сейсмоакустических данных проводилась в среде программного пакета *The Kingdom Suite*, версия 7.6. Основные отражающие горизонты и сейсмофации были откартированы, а затем вдоль линий сейсмоакустических профилей были вынесены значения мощности верхнего сейсмостратиграфического комплекса. Дальнейшая интерпретация и прослеживание палеоврезов проводились вручную, на батиметрической основе, подготовленной для листов R-1,2 и S-1,2 Государственной геологической карты РФ масштаба 1:1 000 000 (Бондаренко и др., 2014; Государственная геологическая карта..., 2005) (рис. 1). Для пересчета скоростных разрезов в глубинные принималась скорость распространения волн в воде 1460 м/с, а в осад-ках — 1700 м/с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Реликтовая долинная сеть в современном рельефе Чукотского шельфа. Современный рельеф Чукотского шельфа характеризуется общей выровненностью, прослеживаются отдельные положительные и отрицательные формы рельефа. Обширная аккумулятивная Южно-Чукотская равнина находится к югу от банки Геральда и прослеживается от пролива Лонга на западе до залива Коцебу у побережья Аляски на востоке (рис. 1). Глубины здесь колеблются в пределах 40–50 м. К северу от зоны поднятий банки Геральда, характеризующейся нечетко выраженным грядовохолмистым рельефом, и вплоть до бровки континентального шельфа располагается Северо-Чукотская равнина. Поверхность дна в ее пределах также в значительной степени выровнена и очень постепенно понижается в сторону бровки шельфа. Диапазон глубин 100–350 м.

Отчетливо выраженные в рельефе дна подводные долины в пределах Чукотского шельфа распространены в его северной части, в диапазоне глубин 60–100 м. Самым крупным образованием является каньон Геральда, протяженностью около 200 км, шириной 40–60 км с относительной глубиной 30–40 м. На обзорной геоморфологической карте Арктики (Harris et al., 2014) каньон Геральда показан как шельфовая долина. Вершина каньона находится в области 60-метровых глубинных отметок, устье — на глубине около 100 м. Каньон врезан в область поднятий, протягивающихся от Аляски до острова Врангеля. К западу от него возвышается поднятие дна, увенчанное скалистым островом Геральда (Зинченко, 2000). К востоку от каньона расположена мелководная банка Геральда с минимальными глубинами около 20 м. К востоку от устья каньона Бика Геральда в диапазоне глубин 60–100 м нижняя часть пологого склона банки Геральда в дузими (шириной до 10 км) неглубокими (врез не более 20 м) субмеридиональными подводными долинами.

Погребенная эрозионная сеть Чукотского шельфа. Коренные породы в пределах Чукотского шельфа на сейсмоакустических разрезах представлены осадочной толщей с ярко выраженной слоистостью. Часто можно увидеть внутреннее строение коренной толщи, осложненной складчатыми и разрывными структурами. Кровля коренных пород изрезана эрозионными врезами — древними речными долинами.

В структуре осадочного чехла Чукотского шельфа по сейсмоакустическим данным выделяется верхний сейсмокомплекс, подошвой которого является резкое угловое несогласие, прослеживающееся по всему региону и совпадающее с эродированной



Рис. 2. Строение отложений, заполняющих палеодолины: *a* — сейсмоакустический профиль по Южно-Чукотской равнине, выполненный спаркером; *б* — сейсмоакустический профиль по восточной части Чукотского шельфа, выполненный профилографом (Hill, Driscoll, 2010). Положение профилей показано на рис. 5.

69



Рис. 3. Фрагменты сейсмоакустических профилей, пересекших палеодолины в пределах банки Геральда: *а-в* — профили, выполненные с помощью бумера (Grantz et al., 1978); *z* — фрагмент профили, выполненного спаркером. Положение фрагментов показано на рис. 5.

70

поверхностью литифицированных пород осадочного чехла. Этот сейсмокомплекс имеет сложную внутреннюю структуру, подразделяется на несколько подкомплексов, имеющих то горизонтально-слоистую, то клиноформную структуру заполнения. Сейсмоакустическими исследованиями американской части Чукотского шельфа (Phillips et al., 1988) было определено четырехчленное строение толщи заполнения палеоврезов: a) самая нижняя клиноформная толща определена как аллювиальная; б) выше по разрезу залегает морская горизонтально-слоистая толща, в) перекрывающая ее косослоистая толща определена как аллювиальная, г) венчающая разрез самая верхняя толща — снова морская. Проведенные позже высокоразрешающие сейсмоакустические исследования (Hill, Driscoll, 2008; 2010; Hill et al., 2007) позволили расчленить разрез на шесть комплексов. Эти генерации выполнения палеодолин идентифицируются и в западной, и в восточной частях Чукотского шельфа (рис. 2). В восточной части шельфа рыхлые отложения заполняют глубокие узкие палеодолины, врезанные в меловые породы, дислоцированные или моноклинально залегающие (Hill et al., 2007; Phillips et al., 1988). В западной части шельфа рыхлые осадки также выполняют понижения в древнем рельефе, выработанном в меловых, палеогеновых и миоценовых породах. Однако эти долины и обширные депрессии характеризуются гораздо большими размерами и располагаются на субгоризонтально залегающих породах. Самой крупной структурой является бассейн стока, занимающий всю Южно-Чукотскую равнину к югу от банки Геральда. Истоки этой части древней речной сети находятся в понижении Берингова пролива и в корытообразном понижении залива Коцебу Саунд у побережья Аляски, где оно носит название «долины Хоуп» (Keigwin et al., 2006). Не исключено, что вся область понижений в юго-западной части Чукотского шельфа была выработана в периоды раскрытия Берингова пролива, не речными, а морскими водами. В периоды регрессий эта область представляла собой озерно-аллювиальныю равнину.

Остальные палеодолины имеют меньшие размеры и характеризуются различным поперечным профилем: *U*- и *V*-образным, симметричным и асимметричным (рис. 3). Некоторые из них, возможно, имеют более молодой возраст, так как толща заполнения подразделяется на четыре или два подкомплекса.

Мощность верхнего сейсмоакустического комплекса. Интерпретация всех доступных сейсмоакустических материалов позволила получить картину распределения осадков верхнего сейсмоакустического комплекса в южной части Чукотского моря (рис. 4). При этом наибольшие его мощности в основном контролируются древней сетью узких палеодолин и широких плоскодонных впадин, имеющих в основном северо-западное простирание. Кроме того, увеличение мощностей связано иногда с областями лавинной седиментации в пределах маргинального фильтра, находившегося в эпохи морских регрессий к северу от острова Врангеля. В отдельных случаях неравномерность распределения четвертичных осадков контролируется течениями. Так, в верховьях желоба Геральда, в пределах его центральной части, западный склон каньона сложен скальными коренными породами, а восточный — аккумулятивной толщей новейших осадков.

Некоторые из палеодолин и современных подводных долин приурочены к разрывным нарушениям. Это видно на сейсмических (МОВ ОГТ) и сейсмоакустических профилях. Кроме того, это подтверждается данными геологического опробования. Так, изучение осадков в желобе Геральда и на его бортах выявило повышенные фоновые содержания и аномалии металлов-сульфофилов, металлов группы железа


Рис. 4. Карта изопахит верхнего сейсмокомплекса осадочного чехла Чукотского шельфа: 1 — бровка шельфа; 2 — использованные сейсмоакустические профили.

и некоторых платиноидов (Астахов и др., 2013). Большинство же палеодолин никак не связано с разломами и имеет чисто экзогенное происхождение.

Обращает на себя внимание широкая полоса мощного чехла позднекайнозойских отложений в пределах Южно-Чукотской равнины. Не исключено, что эта область в периоды регрессий была обширной озерно-аллювиальной равниной. Есть мнение, что в сартанское время (морская изотопная стадия (МИС) 2) эта область представляла собой морской залив, контуры которого совпадают с современной 50-метровой изобатой (Морозова, 1985).

Неясную природу имеют переуглубления с замкнутыми контурами изопахит в восточной части Чукотского шельфа. Некоторые палеодолины фиксируются в виде отдельных фрагментов. Проследить направление древней речной долины, соединив подобные «бессточные» переуглубления, подчас трудно или вовсе невозможно. Такие переуглубления широко распространены на северном шельфе Евразии, и их образование обычно объясняют изменением направлений стока древних рек, искривлением продольных профилей рек в результате тектонических движений и т.д. (Возраст..., 1984; Зархидзе, 1992).



Рис. 5. Погребенные палеодолины Чукотского шельфа: *1* — бровка шельфа; *2* — использованные сейсмоакустические профили; *3* — фрагменты сейсмоакустических профилей, представленных на рис. 2 и 3.

Распространение погребенной речной сети. Выявленные на сейсмоакустических разрезах врезы палеодолин были прослежены по всему шельфу от современной береговой линии до 100-метровой изобаты. Севернее, в пределах Северо-Чукотской наклонной равнины, к сожалению, не проводилось сейсмоакустических исследований. Возможно, 100-метровый уровень является пределом распространения плейстоценовых палеоврезов и совпадает с одной из древних береговых линий Арктического бассейна (Морозова, 1985; Стрелков, 1961). Во внешней части Чукотского шельфа, в области сочленения с Чукотским плато мощность четвертичных осадков исчисляется первыми метрами, либо они вовсе отсутствуют, обнажая изрезанную поверхность коренных пород (Polyak et al., 2007).

Прямым признаком эрозионного происхождения погребенных палеодолин является их плановая сопряженность с речными долинами современной суши. Такие продолжения есть у крупных рек Чукотского полуострова (Амгуэма, Экиатап, Койвельхвээргин и т.д.), Аляски (Кукповрук, Утукок, Коколик и др.). Крупные погребенные палеодолины имеют истоки в современной Колючинской губе и Беринговом проливе (Дунаев, 1985).

Для всех погребенных палеодолин, крупных и мелких, имеющих в основном северо-западное простирание, характерно полное несоответствие направлению подводных долин, выраженных в современном рельефе, ориентированных либо субмеридионально, как на северном склоне банки Геральда, либо в северо-восточном направлении, в сторону каньона Барроу. Таким образом, составленная нами карта погребенных палеодолин Чукотского шельфа (рис. 5) отличается от рисунка речной сети, наблюдающегося в современном рельефе дна, составленного ранее по батиметрическим данным (Ласточкин, 1977).

Возраст толщи выполнения врезов. Американские исследователи считают, что все шесть комплексов, заполняющих палеодолины в восточной части Чукотского шельфа, накопились за последние 200 тыс. лет (Hill, Driscoll, 2008). Ранее специалистами высказывалось мнение о третично-четвертичном возрасте осадков, выполняющих врезы (Phillips et al., 1988). Мы, с учетом результатов изучения скважин в проливе Лонга (Gusev et al., 2009), пришли к выводу о плиоцен-четвертичном возрасте осадков, заполняющих палеодолины. К сожалению, для определения возраста каждого из шести подкомплексов заполнения пока нет данных. Можно с определенной долей уверенности говорить о времени начала формирования речной палеосети в позднем плиоцене. С плиоцен-четвертичными аллювиальными и прибрежно-морскими осадками Чукотского шельфа связаны перспективы россыпной золотоносности (Флеров и др., 2011). Что касается современной долинной сети, выраженной в рельефе дна, ее возраст можно оценить как поздненеоплейстоценраннеголоценовый.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пределах Чукотского шельфа закартирована древняя сеть палеодолин, имеющих в основном эрозионный генезис. Древние погребенные долины имеют в основном северо-западное простирание и характеризуют направление речного стока во время морских регрессий. Простирание погребенных палеодолин отличается от подводных долин, выраженных в современном рельефе дна. Погребенные палеодолины прерывисто прослеживаются до современных 100-метровых глубин. В пределах погребенных палеодолин зафиксированы переуглубления, образование которых, возможно, связано с неотектоническими процессами, осложнившими структуру древней речной сети. Возраст речных и морских осадков, заполняющих погребенные палеодолины, определяется как плиоцен-четвертичный.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Астахов А.С., Гусев Е.А., Колесник А.Н., Шакиров Р.Б. Условия накопления органического вещества и металлов в донных осадках Чукотского моря // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 9. С. 1348–1365.

Бондаренко С.А., Виноградов В.А., Горячев Ю.В., Гусев Е.А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Чукотская. Лист R-1, 2 – остров Врангеля. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. 144 с.

Возраст и генезис переуглублений на шельфах и история речных долин. М.: Наука, 1984. 215 с.

Гладенков А.Ю., Гладенков Ю.Б. Начало формирования межокеанических связей Пацифики и Арктики через Берингов пролив в неогене // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2004. Т. 12. № 2. С. 72–89.

Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Лист S 1,2 – Чукотское море (отв. ред. В.А. Виноградов). Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2005. 60 с.

Гусев Е.А., Аникина Н.Ю., Деревянко Л.Г., Клювиткина Т.С., Поляк Л.В., Полякова Е.И., Рекант П.В., Степанова А.Ю. Развитие природной среды южной части Чукотского моря в голоцене // Океанология. 2014. Т. 54. № 4. С. 505–517.

Дунаев Н.Н. Морфоструктура Берингова пролива // Геология и геоморфология шельфов и материковых склонов. М.: Наука, 1985. С. 77–85.

Зархидзе В.С. Палеогеновая и неогеновая история развития Северного Ледовитого океана // Геологическая история Арктики в мезозое и кайнозое: Материалы чтений памяти В.Н. Сакса. Кн. 2. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1992. С. 6–28.

Зинченко А.Г. Новая орографическая схема арктического шельфа России // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2000. Вып. 3. С. 39–56.

*Ласточкин А.Н.* Подводные долины северного шельфа Евразии // Известия всесоюзного географического общества. 1977. Т. 109. № 5. С. 412–417.

Морозова Л.Н. Уровень позднеплейстоценовой (сартанской) регрессии на шельфе Восточно-Арктических морей // Геология и геоморфология шельфов и материковых склонов. М.: Наука, 1985. С. 85–88.

Павлидис Ю.А. Обстановка осадконакопления в Чукотском море и фациально-седиментационные зоны его шельфа // Проблемы геоморфологии, литологии и литодинамики шельфа. М.: Наука, 1982. С. 47–76.

*Петров О.М.* Геологическая история Берингова пролива в позднем кайнозое // Берингия в кайнозое. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976. С. 28–32.

Полякова Е.И. Арктические моря Евразии в позднем кайнозое. М.: Научный мир, 1997. 146 с.

Свиточ А.А., Талденкова Е.Е. Новейшая история Берингова пролива // Океанология. 1994. Т. 34. № 3. С. 439–443.

*Стрелков С.А.* Развитие береговой линии Арктических морей СССР в четвертичном периоде // Труды института геологии Академии наук Эстонской ССР. 1961. Т. 8. Морские берега. С. 133–146.

*Флеров И.Б., Дундо О.П., Гусев Е.А., Сухорослов В.Л.* Геологические предпосылки богатых россыпей золота на шельфе Чукотского моря // Руды и металлы. 2011. № 3–4. С. 165–166.

*Creager J.S., McManus D.A.* Pleistocene drainage patterns on the floor of the Chukchi Sea // Marine Geology. 1965. Vol. 3. № 4. P. 279–290.

*Elias S.A., Short S.K., Nelson C.H., Birks H.H.* Life and times of the Bering Land Bridge // Nature. 1997. Vol. 382. P. 60–63.

*Grantz A., Mann D.M., May S.D.* Multichannel seismic-reflection data collected in 1978 in the Eastern Chukchi Sea. US Geological Survey Open File Report 86–206. 1988. 4 p.

Gusev E.A., Andreeva I.A., Anikina N.Y., Bondarenko S.A., Derevyanko L.G., Iosifidi A.G., Klyuvitkina T.S., Litvinenko I.V., Petrova V.I., Polyakova E.I., Popov V.V., Stepanova A.Y. Stratigraphy of Late Cenozoic sediments of the western Chukchi Sea: New results from shallow drilling and seismic-reflection profiling // Global and Planetary Change. 2009. Vol. 68. № 1–2. P. 115–131.

Harris P.T., Macmillan-Lawler M., Ruppc J., Baker E.K. Geomorphology of the oceans // Marine Geology. 2014. Vol. 352. P. 4–24.

*Hill J.C., Driscoll N.W., Brigham-Grette J., Donnelly J.P., Gayes P.T., Keigwin L.* New evidence for high discharge to the Chukchi shelf since the Last Glacial Maximum // Quaternary Research. 2007. Vol. 68. № 2. P. 271–279.

*Hill J.C., Driscoll N.W.* Paleodrainage on the Chukchi shelf reveals sea level history and meltwater discharge // Marine Geology. 2008. Vol. 254. № 3–4. P. 129–151.

*Hill J.C., Driscoll N.W.* Iceberg discharge to the Chukchi shelf during the Younger Dryas // Quaternary Research. 2010. Vol. 74. № 1. P. 57–62.

Hopkins D.M. Cenozoic history of the Bering Land Bridge // Science. 1959. Vol. 129. № 3362. P. 1519–1528.

Keigwin L.D., Donnelly J.P., Cook M.S., Driscoll N.W., Brigham-Grette J. Rapid sea-level rise and Holocene climate in the Chukchi Sea // Geology. 2006. Vol. 34. № 10. P. 861–864.

*McNeil D.H., Duk-Rodkin A., Dixon J., Dietrich J.R., White J.M., Miller K.G., Issler D.R.* Sequence stratigraphy, biotic change, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr record, paleoclimatic history, and sedimentation rate change across a regional late Cenozoic unconformity in Arctic Canada // Canadian Journal of Earth Sciences. 2001. Vol. 38. № 2. P. 309–331.

*Phillips R.L., Barnes P., Hunter R.E., Reiss T.E., Rearik D.M.* Geological investigations in the Chukchi Sea, 1984, NOAA ship Surveyor cruise. U.S. Geological Survey open-file report 88-25. 1988. 82 p.

*Polyak L., Darby D.A., Bischof J.F., Jakobsson M.* Stratigraphic constraints on late Pleistocene glacial erosion and deglaciation of the Chukchi margin, Arctic Ocean // Quaternary Research. 2007. Vol. 67. № 2. P. 234–245.

#### E.A. ZYKOV, E.A. GUSEV

# **BURIAL PALEOVALLEYS OF CHUKCHI SHELF**

In the Chukchi shelf revealed a network of Pliocene-Quaternary buried paleovalleys. They are predominantly north-west strike and characterize the direction of river flow during the regression of the sea. The position and direction of buried paleovalleys different from submarine valleys, expressed in modern relief bottom. Buried paleovalleys intermittently traced to the modern 100-meter deep marks. Within paleovalleys fixed overdeepened, the formation of which is related to neotectonic processes complicate the structure of an ancient river network.

Keywords: Chukchi Sea, burial paleovalleys, Beringia, seismoacoustic studies.

УДК 504.054

Поступила 13 января 2015 г.

# УГЛЕВОДОРОДЫ В ВОДАХ И ДОННЫХ ОСАДКАХ БЕЛОГО МОРЯ

д-р. геол.- минерал. наук И.А. НЕМИРОВСКАЯ<sup>1</sup>, науч. сотр. А.В. ТРАВКИНА<sup>1</sup>, д-р. физ-мат. наук И.П. ТРУБКИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>— Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН (ИО РАН), г. Москва, e-mail: nemir@ ocean.ru.

<sup>2</sup> — Всероссийский научно-исследовательский институт экологии, г. Москва, e-mail: trubkin.ivan@bk.ru

Приведены данные многолетних исследований углеводородов в водах и донных осадках Белого моря. Установлено, что геохимический барьер р. Северная Двина — Двинский залив в основном препятствует проникновению загрязнений в Белое море (выполняет функции маргинального фильтра). Поступление большого количества загрязняющих веществ во время половодья приводит к увеличению концентраций углеводородов в водах и донных осадков устья Северной Двины. Трансформация алифатических углеводородов даже при низких весенних температурах способствует доминированию терригенных алканов в осадках. Нефтяные и пирогенные соединения проявляются в составе более устойчивых полициклических ароматических углеводородов.

*Ключевые слова:* нефть, углеводороды, взвесь, донные осадки, геохимические барьерные зоны.

## введение

В последние годы происходит новый этап освоения ресурсов Белого моря и его водосбора, так как планируется увеличение транспортировки нефти и газа из месторождений Баренцева моря в Западную Европу и строительство в связи с этим побочных производств. Мощность архангельских терминалов с 2002 по 2008 г. возросла в 1,8 раза (с 2500 до 4500 тыс. т), а к 2015 г. увеличится до 7000 тыс. т. (Бамбуляк, Францен, 2009). Перевалочная мощность системы «Архангельск—Белокаменка» составляет 12 млн т/год. Увеличение судоходства и особенно перегрузка нефти и нефтепродуктов может создавать аварийные ситуации и рост потока антропогенных углеводородов (УВ) в этом районе. В частности, в ноябре 2011 г. произошел разлив нефти на Беломорской нефтебазе. Площадь загрязнения порта составила 128 тыс. км<sup>2</sup>, а общая площадь загрязнения акватории — 199 тыс. м<sup>2</sup>; загрязненность береговой линии — 400 м<sup>2</sup>.

В отличие от разливов в районах с умеренным климатом, естественная очистка после выбросов нефти в Арктике может длиться не годы, а десятилетия (Диагностический анализ..., 2011; АМАР, 2007). Основную массу (до 95 %) нефти и нефтепродуктов составляют УВ (Израэль, Цыбань, 2009; Немировская, 2013 и др.). Поэтому современная система экологического мониторинга из-за сложности анализа основана на определении содержания УВ.

С целью изучения поведения УВ было проведено их исследование в водах и донных осадках различных районах Белого моря, отличающихся по антропогенной нагрузке.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Влияния разных каналов и источников загрязнения, а также аналитические трудности, возникающие при определении низких концентраций УВ, приводят к тому, что результаты разных методов и разных авторов трудно сопоставить. Мы будем опираться на собственные данные, полученные при определении УВ в основном ИК- или хроматографическими методами (Немировская, 2013).

Для экстракции липидов из воды, взвеси (выделенной на стекловолокнистые фильтры GF/F) и донных осадков использовали метиленхлорид. Для предотвращения разложения УВ их экстрагировали сразу после отбора проб или пробы замораживали при –18 °C. Отдельные углеводородные фракции выделяли гексаном методом колоночной хроматографии на силикагеле. Концентрацию УВ (после колоночной хроматографии на силикагеле. Концентрацию УВ (после колоночной хроматографии на силикагеле). В качестве стандарта использовали смесь (по объему): 37,5 % изооктана, 37,5 % гексадекана и 25 % бензола. Чувствительность метода — 3 мкг/мл экстракта (Немировская, 2013; Руководство..., 1993).

Содержание и состав полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе LC-20 Prominence (фирмы «Shimadzu»); колонка — «Envirosep PP» при температуре термостата 40 °C; в градиентном режиме (от 50 % объемной доли ацетонитрила в воде до 90 %); скорость потока элюента — 1 см<sup>3</sup>/мин, при этом использовали флуоресцентный детектор RF-20A с программируемыми длинами волн поглощения и возбуждения. Расчет проводили с помощью программного обеспечения «LC Solution». Калибровали прибор при помощи индивидуальных ПАУ и их смесей производства фирмы «Supelco». В результате были идентифицированы 16 приоритетных полиаренов, рекомендованных при изучении загрязненности морских объектов (Monitoring, 2011): Н — нафталин, МеН-1 — метилнафталин, Флуор — флуорен, Ф — фенантрен, АН — антрацен, ФЛ — флуорантен, П — пирен, БаН — бенз(а)антрацен, ХР — хризен, ПЛ — перилен, БбФЛ — бенз(b)флуорантен, БКФЛ — бенз(g, h, i)перилен, ИНД — инден(1, 2, 3-с, d)пирен.

Определение С<sub>орг</sub> в пробах взвесей проводили методом сухого сожжения на анализаторе АН-7529 (Люцарев, 1986). Фильтр (или его часть) помещали в фарфоровый тигель, и использовали обычные процедуры, применяемые при определении С<sub>орг</sub> в донных осадках. Чувствительность метода 6 мкг углерода в пробе, точность 3–6 относительных процентов.

При обсуждении результатов приведено используемое районирование Белого моря: Кандалакшский, Двинский заливы, Бассейн — центральная часть моря, Горло — район, связывающий Белое море с Баренцевым.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

#### Геохимический барьер река-море

До последнего времени считалось, что решающий вклад в суммарное поступление нефтяных УВ в моря Арктики принадлежит речному стоку, благодаря которому потоки нефти могут исчисляться десятками и сотнями тысяч тонн в год (Dushkova, Evseev, 2011). Взвеси, поступающие с реками, обогащены различными соединениями и становятся своеобразными «геохимическими ловушками», способствующими аккумуляции компонентов речного стока, в том числе и антропогенных (Лисицын, 2014).

Таблица 1

Форма			Липиды		Углеводороды			
соединений	n	Мин.	Макс.	Средн.	Мин.	Макс.	Средн.	
Белое море								
Устье Северной Лвины, сентябрь 2011 г								
Растворенная	5	24,6	50,3	28,9	17,0			
Взвешенная	5	65,4	155,7	87,4	30,2	69,2	37,6	
Периферия Двинского залива, июнь 2014 г.								
Взвешенная	7	33,7	47,0	40,5	11,2	16,3	13,4	
Разрез п. Архангельск – Баренцево моря, сентябрь 2011 г.								
Взвешенная	5	33,5	47	40,5	9,4	33,2	13,5	
Баренцево море								
Горло Белого моря – Карские Ворота, сентябрь 2011 г.								
Растворенная	5	17,5	75,6	34,4	7,5	14,9	10,4	
Взвешенная	5	26,2	77,2	41,6	7,7	20,9	13,1	
Прибрежный район Кольского п-ова, октябрь 2014 г.								
Взвешенная	6	15,3	29,4	20,2	6,9	11,6	10	
Карское море								
Обский разрез, сентябрь 2007 г.								
Растворенная	13	24,8 427,2 152,4 9,7 21				215,9	84,1	
Взвешенная	13	14,6	348,3	169,1	6,2	200,3	77,1	
Енисейский разрез, сентябрь 2011 г.								
Растворенная	15	21,6	133,8	40,2	4,8	69,0	17,6	
Взвешенная	14	21,7	236,5	83,3	7,3	49,1	20,1	
Таймырский разрез, сентябрь 2011 г.								
Растворенная	4	12,9	20,5	16,4	6,4	9,6	8,1	
Взвешенная	4	32,2	41,3	38,2	7,4	16,5	13	
Желоб Св. Анны (восток), сентябрь 2011 г.								
Растворенная	5	8,7	42,0	19,5	2,0	16,2	8,7	
Взвешенная	5	7,5	42,9	26,8	3,2	18,0	6,5	
Новоземельский разрез, сентябрь 2011 г.								
Растворенная	4	9,1	20,3	14	5,5	11,6	6,6	
Взвешенная	4	30,6	52,7	43	16,5	22,5	18,8	

## Содержание липидов и углеводородов (мкг/л) в поверхностных водах арктических морей (*n* — количество проб)

Действительно, наши исследования, проведенные в поверхностных арктических водах, показали, что наибольший диапазон концентраций наблюдался в приустьевых районах — маргинальных фильтрах рек (табл. 1).

Эта область состоит из трех зон: гравитационной, физико-химической и биологической (Лисицын, 2014). В первой (пресноводной) зоне из-за подпруживания речных вод морскими происходит основное осаждение крупнодисперсных фракций, а с ними и УВ. Во второй зоне смешения вод при флоккуляции и коагуляции частиц благодаря физико-химическим законам происходит переход растворенной формы УВ во взвесь и осаждение в донные осадки. В третьей зоне, с просветлением воды и синтезом фитопланктона, наблюдается увеличение концентраций УВ природного (биогенного) происхождения.

Работа маргинальных фильтров Арктики зависит от сезонов и продукции планктона, определяющего потоки осадочного вещества (Лисицын, 2014). Водосборы рек Белого моря различаются своими почвенно-геологическими условиями, озерностью и заболоченностью территорий, хозяйственной освоенностью и в целом направленностью и характером природопользования (Лисицын, 2010). Эти факторы вместе с режимом питания рек и изменчивостью климатических характеристик определяют условия формирования водного и химического стока рек, состав компонентов речных вод и их качество, а также санитарное состояние речных водных ресурсов. Воды рек, впадающих в Белое море, также отличаются по среднемесячным и среднегодовым соотношениям органических и минеральных соединений. Поэтому эти воды обладают разным потенциалом по своему влиянию на развитие процессов трансформации веществ и продукционных процессов в морской среде. Водные объекты водосбора — потенциальные источники загрязнения устьев впадающих в Белое море рек. Наибольший объем выноса на устьевой участок химических веществ характерен для р. Северной Двины, наименьший — для р. Нивы. Согласно полученным данным во время летней межени (август 2001–2014 гг.) «потери» УВ на геохимическом барьере р. Северная Двина — Двинский залив могут достигать 67 % (табл. 2).

Таблица 2

Река	Горизонт	Потери (растворенные/ взвешенные)	Река	Горизонт	Потери (растворенные/ взвешенные)	
Северная	пов., 2001, прилив*	25/0	Замбези	пов.	65/82	
Двина	пов., 2003, прилив*	33/14	Нева	ПМС	47/20	
	пов., 2006, прилив*	24/15		пов.	63/85	
	пов., 2007, отлив*	-/67	Неман	пов.	75/-	
	пов., 2006, отлив**	8/27	Амур	пов.	10/75	
Кемь	пов., 2011	-/82		дно	50/-	
Обь***	пов., 1993	—/25	Даугава	ПМС	68/48	
Обь	пов., 2007	37/27		пов.	88/80	
Енисей***	пов., 1993	—/17		дно	77/80	
Енисей	пов., 2011	10/26	Днепр пов.		84/80	
Конго	пов.	47/73	Рона**** пов., 1992		-/85	
Лимпопо	пов.	68/92		пов., 1994 г	—/76	

«Потери» УВ (%) на геохимическом барьере река – море

*Примечания*: \*— межень; \*\*— половодье; \*\*\*— Fernandes, Sicre, 2000; \*\*\*\*— Dai et al., 1995; ПМС — поверхностный микрослой.

Проникновение баренцевоморских вод в Бассейн и в примыкающие к нему заливы в августе только начинается, максимальное их количество приходится на ноябрь–декабрь. Поэтому в конце летней межени еще сохраняется сильное влияние стока Северной Двины на формирование водных масс Двинского залива (Елисов, 1999).

В маргинальном фильтре Северной Двины так же, как в водах других северных рек, УВ преимущественно содержатся в растворенной форме, так как реки протекают по почвам, богатым гумусом (Лисицын, 2014), и минимальное значение отношения УВв/УВр (взвешенной формы к растворенной) составляло 0,4. В остальных пробах содержание УВв на разрезе река — море выше, чем УВр. Во время прилива увеличивалась разница в концентрациях УВв между речными и морскими водами (табл. 2). При этом содержание УВ контролировалось изменением количества взвеси, и между этими соединениями существовала зависимость: *r*(взвесь – УВв) = 0,78.



Рис. 1. Изменчивость различных соединений в поверхностных водах в зависимости от солености на геохимическом барьере р. Северная Двина — Двинский залив во время прилива в августе 2007 г.: (*a*) — взвесь, липиды, УВ; (*б*) — ПАУ и маркеры в их составе при разной солености: I = 0,3; 2 = 1,4; 3 = 5,9; 4 = 15,6 епс.

Наиболее резко содержание УВв уменьшалось в гравитационной области до S = 1,4 епс (рис. 1*a*).

Рост концентраций при S = 11,8 епс, возможно, вызван развитием фитопланктона в биологической части фильтра. Отсутствие корреляции в распределении углеводородных компонентов в поверхностных и придонных водах указывает на ограниченное смешивание речных вод с морскими. Вариации концентраций могут быть также обусловлены влиянием приливно-отливных движений воды, абразией берега, наличием островов.

В устье Северной Двины и в Двинском заливе высокая концентрация промышленных объектов и сброс в реку стоков от предприятий Архангельска снижают качество воды на дельтовом участке реки (Михайлов, 1997). Однако нефтяной состав УВ установлен только в поверхностных водах в гравитационной зоне. Осенью 2014 г. в устье Северной Двины содержание УВв в поверхностных водах (33,2 мкг/л) не достигало величины ПДК для нефтяных УВ (50 мкг/л) и в пересчете на мг взвеси составило всего 5,8 мкг. Для сравнения в районе п. Калининград в устье р. Преголь их концентрация достигала 10,7 мкг/мг взвеси.

В составе ПАУ при прохождении маргинального фильтра увеличивалось количество природных соединений (фенантрена), уменьшалась доля пирогенных (пирена) и нефтяных (нафталина) полиаренов (рис. 16). Отношение нафталин/фенантрен, которое при значениях > 1 маркирует невыветренные нефтепродукты (Tolosa et al., 2004), минимально в водах Двинского залива — 0,70, а максимально — в сорбционной физико-химической части маргинального фильтра — 3,06; в гравитационной части фильтра это отношение составило 2,87.

Во время весеннего половодья были проведены исследования как в кутовой части Двинского залива, так и в рукавах дельты Северной Двины (рис. 2).

В это время содержание УВ в водах маргинального фильтра Северной Двины значительно превысило их концентрации по сравнению с летней меженью. Наиболее резко изменялось их содержание во взвеси: от 560 до 130 мкг/л, — и по направлению к заливу уменьшалось в 2–11 раз. При весеннем таянии снега и льдов в речную воду переходят накопленные в них за длительный зимний период из атмосферы и из водосбора большое количество органических веществ (ОВ) (Лисицын, 2010). Сток



взвешенных наносов в Белое море во время половодья превышает меженный в 1,5–2 раза, а в некоторые сезоны — более чем в 5 раз (Кравчишина, 2009). Повышенное количество УВ (36–66 мкг/мг взвеси) наблюдалось в районах слива загрязненных вод АЦБК и в протоке Маймакса. Напротив, в относительно чистых районах (в устье р. Пинеги, впадающей в Северную Двину до г. Архангельска), при довольно высокой концентрации взвеси (32,2 мг/л), доля УВв в составе  $C_{opr}$  понижалась до 12,9 % и составляла всего 4,2 мкг/мг взвеси. Вследствие этих причин не наблюдалась кореляция между распределением взвеси и ОВ во взвеси: r(взвесь – липиды) = -0,06, r(взвесь – УВв) = -0,11. В то же время существовала связь между содержанием липидов и УВв: r(VB - липиды) = 0,97, видимо, липидная фракция в основном состояла из УВ.

Повышение концентраций УВв на станциях в черте г. Архангельска в основном русле реки вызвано их поступлением с загрязнением, так как наблюдалось увеличение доли УВв в составе С<sub>орг</sub> (> 70 %) и в пересчете на воздушно-сухую взвесь (> 50 мкг/мг взвеси). В основном течении реки на траверзе о. Мудьюг воды отличались высокой мутностью, где концентрация взвеси достигала 20–30 мг/л (Кравчишина, 2009). Видимо, даже незначительный рост солености приводит к тому, что в процессе коагуляции и флоккуляции растворенные формы ОС переходят во взвесь. Поэтому в физико-химической части маргинального фильтра наблюдалось концентрирование УВв.

Содержание ПАУ также уменьшалось при прохождении маргинального фильтра: от 204 до 39 нг/г. В их составе концентрации природного полиарена — фенантрена изменялись меньше, чем пирогенного — пирена. Отношение нафталин/фенантрен, которое при значениях > 1 маркирует невыветренные нефтепродукты, минимально в водах Двинского залива — 0,70, а максимально — в сорбционной физико-химической части маргинального фильтра Северной Двины — 3,06.

#### Таблица 3

N⁰	Горизонт,	Растворенные		Взвешенные		% ot C <sub>opp</sub>		мкг/мг взвеси		S and
станции	М	Липиды	УВ	Липиды	УВ	Липиды	УB	Липиды	УВ	s, enc
Гравитационная зона маргинального фильтра										
15	0	16,0	12,3	218,9	200,3	38,7	35,9	16,5	15,3	0,07
16	0	63,2	54,9	232,0	219,2	42,3	33,4	15,0	11,9	0,06
17	0	133,1	110,0	358,6	338,2	89,9	66,5	62,6	46,3	0,06
	11	107,5	88,8	376,7	343,2	_	-	67,3	49,8	0,06
19	0	87,3	36,2	427,4	398,3	48,8	36,1	64,1	47,4	0,06
20	0	32,5	26	386	256,3	64,8	43,0	53,8	35,7	0,05
21	0	45,1	40,7	_	_	_	_		_	0,06
22	0	-	_	363,1	286,8	45,6	36,0	82,9	65,5	0,06
25	0	51,5	37,6	181	150,0	_	_	_	_	0,06
23	0	183,2	152,6	504	399,4	39,7	31,5	52,5	41,6	0,06
	10	144,6	141,2	408,7	307,7	_	_	42,6	32,0	0,06
24	0	_	_	599	565,1	77,6	73,3	48,8	46,1	0,06
26	0	-	_	286,5	246,5	_	15,54	_	_	0,06
27	0	-	_	218,1	192,2	_	21,44	_	_	0,07
41	0	59,9	34	_	_	_	_	_	_	_
Физико-химическая зона маргинального фильтра										
13	0	118,5	100,6	591,4	549,1	54,4	50,5	54,2	50,3	0,21
	2	66,6	41,3	561,4	475	56,6	47,9	45,3	38,43	0,34
	4	59,3	38,4	409,1	352	34,6	25,6	21,3	15,8	0,34
14	0	31,8	28,2	457,2	419,1	84,5	77,5	25,3	23,2	0,08
	5	_	_	466,4	427,5	65,5	60,0	40,9	37,5	0,09
	11	_	—	457,2	419,1	66,3	60,7	29,4	26,9	1,28

Содержание липидов и алифатических углеводородов (мкг/л) во время половодья в устье Северной Двины (расположение станций приведено на рис. 2)

В открытых водах Белого моря содержание растворенных УВ изменялось в диапазоне: от 5 до 35 мкг/л, что ниже ПДК для нефтяных УВ и соответствовало их концентрациям в водах других арктических морей (табл. 1). В частности, летом 2014 г. в поверхностных водах на периферии Двинского залива содержание УВ (в среднем 13,3 мкг/л) соответствовало их фоновому уровню в прибрежных районах — 10–20 мкг/л (Немировская, 2013). Малый разброс данных, так как стандартное отклонение ( $\sigma$ ) — 1,7 мкг/л, при низком содержании УВ в составе липидов (в среднем 33,8 %) может свидетельствовать в пользу их природного происхождения.

В толще воды с глубиной содержание УВ уменьшалось. Однако это отнюдь не означает монотонного их распределения. В отдельных случаях происходило увеличение концентраций УВ в области галоклина. В глубоководных районах (Бассейн, Горло) содержание УВ у дна оказалось выше, чем на поверхности, что особенно характерно для станций с тонкодисперсными осадками. Поэтому в придонной воде, отобранной из трубки Неймисто, концентрации УВ увеличивались до 906 мкг/л. Рост концентраций УВ в придонном горизонте рассматривается как результат эрозии дна и ресуспензирования, и вторичная миграция УВ является достаточно распространенным процессом (Немировская, 2013).

#### Донные осадки

Донные осадки Белого моря в основном относятся к пелитам и алеврито-пелитам. Содержание пелитовой фракции в них колеблется от 65 до 80 % с максимальной долей в глубоководной части Бассейна. Пески в основном приурочены к авандельте Северной Двины. Концентрации ОВ изменялись в широком интервале и зависели от гранулометрического типа донных осадков. При переходе от песчанистых осадков к илистым их содержание увеличивалось более чем в 3 раза (рис. 3a) с максимумом в алеврито-пелитовом иле из Кандалакшского залива. Даже в песчано-илистом материале припортовой акватории Архангельска их концентрация была ниже.

Из-за интенсивной седиментации в Двинском заливе основным накопителем OC становятся илистые отложения. Поэтому более высокое содержание УВ в поверхностном слое в 2006 г. установлено в илистых осадках в кутовой части Двинского залива в зоне лавинной седиментации (рис. 3). Концентрации УВ также повышены на станции, находящейся под влиянием вод, поступающих из Двинского залива в район Горла (62,5 мкг/г), а также в районе Соловецких о-вов (80,2 мкг/г). В то же время доля УВ в составе С<sub>орг</sub> максимальна в песчанистом осадке из Двинского залива — 6,4 %. Последнее может быть обусловлено пассивной сорбцией антропогенных УВ донными осадками при небольших глубинах. Напротив, в осадках Бассейна доля УВ в составе С<sub>орг</sub> понижена (0,29–0,44 %), и степень антропогенной загрязненности грубодисперсных осадков выше, чем илистых.

Летом 2010 г. снижение концентраций УВ в песчанистых осадках (рис. 4), скорее всего, связано с тем, что был отобран слой осадка 0–4 см, а в 2006 г. — окисленный слой 0–0,5 см. При переходе от окисленных к восстановленным осадкам содержание УВ обычно уменьшается (Немировская, 2013).

Наиболее высокое содержание УВ, так же, как и С<sub>орг</sub> установлено в илистых осадках губ Ругозерской и Еремеевской и эпишельфового озера (до 96 мкг/г и 1,06 % соответственно). В открытых районах моря их концентрации снижались. В составе С<sub>орг</sub> доля УВ колебалась для илистых отложений от 0,08 до 1,06 %, а для песчаных —



Рис. 3. Распределение концентраций С<sub>орг</sub> и УВ в поверхностном слое донных осадков разного гранулометрического типа Белого моря (*a*) и дельты Северной Двины (б). П—песчанистые, АП—алеврито-пелитовые, АПК—алеврито-пелитовые осадки Кандалакшского залива, ПИА— песчано-илистый материал припортовой акватории Архангельска. 01... 14—годы исследований.



Рис. 4. Изменение концентраций УВ в донных осадках Белого моря (сверху обозначены концентрации мкг/г) в разные годы исследования.

от 0,08 до 0,32 %. При высокой концентрации УВ в пересчете на сухую массу (33–96 мкг/г) илистые осадки отличались низкой концентрацией УВ в составе С<sub>орг</sub> (0,18 %). На периферии Двинского залива и в проливах Соловецкой Сальмы доля УВ повышалась до 0,32 %.

Летом 2012 г. концентрации УВ в илистых осадках остались на уровне 2010 г. (рис. 4), в среднем 16 мкг/г, но в песчанистых осадках снизились синхронно с С<sub>орг</sub> (рис. 3*a*). Обусловлено это тем, что осадки отбирали в основном в открытых районах моря. Летом 2014 г. в донных осадках, представленных в основном пелитовыми илами, концентрации УВ в среднем составили 14,5 мкг/г. Снижение концентраций УВ в последние годы может свидетельствовать об эффективности используемых мер по предотвращению нефтяного загрязнения.

По содержанию ПАУ осадки можно отнести к слабо загрязненным (максимальная концентрация для илистых — 97,4, а для в песчанистых — 30 нг/г), так как сумма 3–6-кольчатых полиаренов в основном < 100 нг/г (Tolosa et al., 2004). Исключение представляет донный осадок в районе Соловецкой Сальмы, где содержание ПАУ достигло 236 нг/г. Однако, согласно маркерам, загрязнение здесь минимальное, так как отношение (П + БП)/(Ф + ХР) = 0,02, а отношение ФЛ/(ФЛ + П) = 0,99. В составе ПАУ поверхностного слоя донных осадков (см. раздел «Методика исследований») среднее содержание индивидуальных приоритетных полиаренов уменьшалось в последовательности П (22,9 %) > ФЛ (20,3) > Ф (16,1) > ПЛ (13,0) > ХР (9,6) > БКФЛ

85

(8,9) > H(4,6) > БП(2,2) = AH(2,2), %. Пирогенными ПАУ загрязнен в наибольшей степени песчанистый осадок на периферии Двинского залива при концентрации 48,5 нг/г. Это еще раз свидетельствует о том, что суммарная концентрация не может служить мерой загрязненности донных осадков.

Во время половодья в песчано-алевритовых осадках рукавов дельты Северной Двины, несмотря на довольно постоянный их гранулометрический состав, характерна высокая дисперсность концентраций (рис. 36) как для УВ (13,1–329,4, средняя 105,7,  $\sigma = 73,4$  мкг/г), так и С<sub>орг</sub> (0,015–3,31 %, средняя 1,02,  $\sigma = 2,98$  %). Обусловлено это множественностью источников поступления OB. В то же время для всего массива данных гранулометрический фактор оказывает основное влияние, так как в целом наблюдалась зависимость между распределением изучаемых OB:  $r(C_{opr} - YB) = 0,81$ . Это может свидетельствовать об одинаковых путях поступления природных и антропогенных соединений в донные осадки, а также о быстрой трансформации нефтяных УВ. Однако в рукавах Северной Двины, где поток загрязнений возрастал, эта зависимость отсутствовала (в частности, в протоке Кузничиха  $r(C_{opr} - YB = 0,19)$ . В районах потенциального поступления нефтяных УВ (АЦБК, Чижовский рейд, порт Экономия) доля УВ в составе С<sub>орг</sub> достигала 36 %. В морских донных осадках концентрации УВ  $\leq 50$  мкг/г в илистых и  $\leq 10$  мкг/г в песчанистых считаются фоновыми, при этом их доля в составе С<sub>орг</sub> обычно  $\leq 1$  % (Немировская, 2013; Tolosa et al., 2004).

Концентрации УВ в дельте Северной Двины во время половодья оказались сопоставимыми с их содержанием в осадках районов с постоянными нефтяными поступлениями. В частности, в осадках северного шельфа Каспийского моря, представленных песчанистыми отложениями с ракушью и водорослями и довольно низким содержанием С<sub>орг</sub> (0,197–0,582 %), концентрации УВ изменялись в интервале 70–4557 мкг/г (Немировская, 2013). На западном побережье о. Тайвань в дельте рек Каопинг и Тунгкам в осадках концентрации УВ были еще выше: 869–10300 мкг/г (Jeng, 2006). Напротив, в эстуарных районах северо-западной части Черного моря содержание УВ было ниже и изменялось от 5 до 402 мкг/г (Немировская, 2013), по другим данным в устье Дуная — от 49 до 220 мкг/г (Redman et al., 2002).

Однако, несмотря на столь высокие концентрации УВ, в составе алканов осадков рукавов дельты Северной Двины в высокомолекулярной области доминировали терригенные гомологи, которые обладают наибольшей стабильностью (рис. 5 цвет. вклейки).

Согласно маркерам нефтью в большей степени загрязнены осадки в районе слива загрязненных вод АЦБК, где величина СРІ (отношение нечетных к четным гомологам в высокомолекулярной области) составила всего 1,29. Однако и здесь преобладали высокомолекулярные гомологи, так как отношение низко- к высокомолекулярным алканам в среднем составило 0,62.

В Никольском рукаве и в протоке Маймакса в отдельных пробах значения CPI > 2, т.е. преобладают более устойчивые аллохтонные алканы. Некоторое увеличение гомологов н-C19–C23 обусловлено микробиальным их образованием. Нефтяные УВ могут способствовать интенсификации биохимических процессов (Corner, 1978), поэтому может повышаться доля автохтонных алканов в осадках, загрязненных нефтепродуктами (Немировская, 2013). Кроме того даже в период гидрологической зимы активность нефтеокисляющих микроорганизмов может достигать 57, а летом — 80 нг л/ч (Ильинский, Семененко, 2001). Поэтому после разлива нефти (район о. Баффин,



Рис. 6. Состав ПАУ донных осадков дельты Северной Двины во время половодья: *1* — ст. 13, район о. Мудьюг; *2* — ст. 19, район слива вод ЦБК; *3* — р. Лая; *4* — ст. 55, Чижовский рейд.

Арктика) оказалось, что в составе алканов прибрежных осадков доминировали биогенные автохтонные и аллохтонные гомологи. Отношение пристан/фитан (i-C19/i-C20) изменялось от 5 до 15, а величина CPI — от 3 до 11 (Wang, Fingas, 2003), то есть трансформация алканов протекает быстро даже при низких температурах.

В осадках рукавов Северной Двины во время половодья также наблюдались повышенные концентрации ПАУ (в среднем 420 нг/г), как и в физико-химической области маргинального фильтра в области лавинной седиментации, в районе о. Мудьюг (в среднем 600 нг/г) (рис. 6). При этом согласно маркерам в составе ПАУ донных осадков максимальное количество пирогенных соединений было установлено в районе г. Новодвинска, где в марте была зафиксирована максимальная концентрация ПАУ во взвеси снега (Немировская, 2013). Видимо, при небольших глубинах полиарены при таянии снега попадают с взвесью в донные осадки без существенных изменений, то есть скорость осаждения превышает скорость трансформации.

Подробное исследование стойких органических загрязняющих веществ в осадках Белого моря показало, что повышенные их концентрации во время летней межени тяготеют к кутовой части Кандалакшского и Двинского заливов (Monitoring..., 2011). Содержание бенз(а)пирена согласно классификации соответствует II классу, как незначительное (< 420 нг/г), в то время как концентрации бензфлуорантена, индопирена и бензперилена в отдельных случаях соответствовали IV классу — опасному загрязнению (700–4800 нг/г). Содержание других ПАУ соответствовало I и II классам, за исключением БПЛ в осадках Двинского залива. Согласно общей картине уровни ПАУ свидетельствовали в основном о незначительном загрязнении донных осадков.

Наши данные совпадают с результатами, полученными при анализе донных осадков арктических морей (Карского, Баренцева, Белого и др.) (AMAP, 2007), которые установили, что с 1990 г. не произошло значительных изменений в содержании и составе УВ. При современных концентрациях нефтяных УВ и наиболее токсичных ПАУ в морских водах биологические эффекты отсутствуют либо проявляются в форме первичных (в основном обратимых) физико-биохимических реакций.

## выводы

Распределение УВ в районе геохимического барьера р. Северная Двина – Двинский залив подчиняется закономерностям маргинального фильтра. Загрязнения, выносимые реками, оседают в основном в области маргинальных фильтров и не попадают в открытые морские акватории. Очевидно, поступление нефтяных и пирогенных УВ формирует повышенный углеводородный уровень в донных осадках и в основном в приустьевых акваториях.

Во время половодья происходило увеличение концентрации УВ в воде и донных осадках по сравнению с летней меженью. Содержание УВв изменялось в интервале 192–565, УВр — 12,3–153 мкг/л. В этот период в речную воду переходят накопленные в снеге и льдах большое количество органических соединений природного и антропогенного происхождения. Несмотря на то, что УВ содержались преимущественно во взвеси, их распределение не зависит от общего количества взвешенного материала, что, скорее всего, вызвано локальным поступлением антропогенных соединений.

В донных осадках во время половодья концентрации УВ в среднем 105,7 мкг/г соответствовали их содержанию в акваториях с постоянным поступлением загрязняющих веществ. Концентрации и состав УВ зависят от интенсивности половодья. В зонах с повышенной седиментацией происходит погребение донных осадков слоем поступающих новых, что приводит к уменьшению их концентраций.

На содержание и состав ПАУ в донных осадках оказывает влияние поступление не только с нефтяным загрязнением, но и из атмосферы. Из-за большей устойчивости полиаренов, по сравнению с алканами, в их составе во время половодья преобладали нефтяные и пирогенные УВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14–05–00223), Совета по грантам Президента РФ и государственной поддержке ведущих научных школ (НШ-618.2012.5), программы 3 фундаментальных исследований Президиума РАН (Биогеохимические исследования снежно-ледяного покрова, водной толщи, донных осадков, газогидратов и эмиссии метана в морях западого сектора Российской Арктики) и гос. задания 0149-2014-0038 «Геолого-геохимические исследования природных и антропогенных процессов в воде, взвесях и донных осадках морских акваторий, в том числе в окраинных районах Мирового океана».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бамбуляк А., Францен Б. Транспортировка нефти из российской части Баренцева региона по состоянию на январь 2009 года. Норвегия, Тромсё, Акваплан-Нива. 2009. 97 с.

Диагностический анализ состояния окружающей среды арктической зоны Российской Федерации (расширенное резюме). М.: Научн. мир, 2011. 124 с.

*Елисов В.В.* Оценка объемов водных масс Белого моря // Метеорология и гидрология. 1999. № 9. С. 78–85.

Израэль Ю.А., Цыбань А.В. Антропогенная экология океана. М.: Флинта. Наука, 2009. 529 с.

Ильинский В.В., Семененко М.Н. Распространение и активность углеводородоокисляющих бактерий в Карском и Белом морях. Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М.: Научн. мир, 2001. С. 364–375.

*Кравчишина М.Д.* Взвешенное вещество Белого моря и его гранулометрический состав. М.: Науч. мир, 2009. 264 с.

*Лисицын А.П.* Процессы в водосборе Белого моря: подготовка, транспортировка и отложение осадочного материала, потоки вещества, концепция «живого водосбора» // Система Белого моря. Т. 1. М.: Научн. мир, 2010. С. 353–445.

*Лисицын А.П.* Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер земли // Мировой океан Т. 2. М.: Научн. мир, 2014. С. 331–571.

*Люцарев С.В.* Определение органического углерода в морских донных отложениях методом сухого сожжения // Океанология. 1986. Т. 26. Вып. 4. С. 704–708.

*Михайлов В.Н.* Устья российских рек и прилегающих стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.

*Немировская И.А.* Углеводороды в воде, взвесях, сестоне и донных осадках Белого моря в конце летнего периода // Вод. ресурсы. 2009. Т. 36. № 1. С. 68–79.

*Немировская И.А.* Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Научн. мир, 2013. 432 с.

Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А. Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 224 с.

Руководство по методам анализа морских вод. РД 52.10. 243-92 / Под ред. С.Г.Орадовского. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. 264 с.

AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme). AMAP Assessment 2002: Persistent organic pollution in the Arctic. Oslo: AMAP, 2007. 87 p.

*Corner E.D.* Pollution studies with marine plankton. Part 1 // Advances in marine biology. 1978. Vol. 15. P. 289–380.

Dushkova D., Evseev A. Analisys of technogenic impact on geosystems of the European Russian North // Arctic and North. 2011. № 4. P. 1–30.

Jeng W. L Higher plant n-alkane average chain length as an indicator of petrogenic hydrocarbons contamination in marine sediments // Mar. Chem. 2006. Vol. 102. № 3–4. P. 242–251.

Monitoring of hazardous substances in the White Sea and Pechora Sea: harmonisation with OSPAR's Coordinated Environmental Monitoring Programme (CEMP). Tromsø: Akvaplan-niva, 2011. 71 p.

*Readman J.W., Fillmann G., Tolosa I.* Petroleum and PAH contamination of the Black Sea // Mar. Poll. Bull. 2002. Vol. 44. P. 48–62.

*Tolosa I., Mora S., Sheikholeslami M.R et al.* Aliphatic and Aromatic Hydrocarbons in coastal Caspian Sea sediments // Mar. Pol. Bul. 2004. Vol. 48. P. 44–60.

*Wang Z., Fingas M.F.* Development of oil hydrocarbon fingerprinting and identification techniques // Mar. Pol. Bul. 2003. Vol. 47. № 3. P. 423–452.

I.A. NEMIROVSKAY, A.V. TRAVKINA, I.P. TRUBKIN

# HYDROCARBONS IN WATER AND BOTTOM SEDIMENTS OF THE WHITE SEA

The data of long-term studies of hydrocarbons (aliphatic and polycyclic aromatic) in water and bottom sediments of the White Sea were presented. The content of hydrocarbons in water corresponds to their level in other Arctic seas. Geochemical barrier between the Northern Dvina River and Dvina Bay mostly prevents the penetration of pollution into the White Sea serving as a marginal filter). During the flood a lot of pollutants enter the Northern Dvina River. It leads to increase the concentration of hydrocarbons in water and bottom sediments of the river's mouth. However, despite the low spring temperatures, the transformation of aliphatic hydrocarbons takes place so rapidly, that terrigenous alkanes dominate in the bottom sediments. Oil and pyrogenic compounds are observed in a more stable composition of polycyclic aromatic hydrocarbons.

Keywords: oil, hydrocarbons, snow-ice covered, particulate matter, bottom sediments.

УДК [656.614.35:551.467](98)

Поступила 19 февраля 2015 г.

# АКТУАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕВАЛКИ ГРУЗОВ ЧЕРЕЗ ПРИПАЙ

канд. физ.-мат. наук Н.В. КУБЫШКИН, канд. геогр. наук Ю.П. ГУДОШНИКОВ ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: kuba@aari.ru, guo@aari.ru

Рассмотрен современный подход к инженерному обеспечению безопасности выгрузки на припай и транспортировки грузов по льду. Рассмотрены опыт подобных операций в Российской Арктике и использование современных технологий для их расширения.

*Ключевые слова:* ледяной покров, физико-механические свойства, грузовые операции, безопасность, арктические моря.

## ЛЕДЯНОЙ ПОКРОВ ПРИРОДНЫХ ВОДОЕМОВ КАК ЧАСТЬ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Ледяной покров морей, озер, рек всегда являлся препятствием для судоходства, а воздействие льда на берега, береговые и морские сооружения представляет собой угрозу, которую необходимо учитывать при выборе места расположения и проектировании гидротехнических объектов. Тем не менее люди, живущие в районах с замерзающими водоемами, издавна приспособились использовать ледяной покров для сокращения расстояний при передвижении и транспортировке грузов через водные объекты без использования плавсредств. С развитием техники и началом использования в транспортных целях с конца XIX — начала XX в. тяжелых транспортных средств на рельсовом, колесном и гусеничном ходу, вес которых вместе с грузом составлял тонны и десятки тонн, возникла потребность в специализированном инженерном обеспечении ледовых переправ, которое объединяло знания гидрометеорологического режима водоемов и технические решения оборудования дорог на ледяном покрове.

В России в качестве примера инженерного обеспечения сложной ледовой переправы можно привести зимнюю железную дорогу по льду озера Байкал длиной 45 км, организованную еще в 1904 г. (Песчанский, 1963). Еще одним интересным примером грамотной организации ледовых перевозок является история движения трамваев в Санкт-Петербурге по льду реки Невы с 1895 по 1910 г. Но, несомненно, самым впечатляющим мероприятием в истории ледовых переправ была и останется ленинградская «Дорога жизни», в ходе эксплуатации которой за два зимних сезона 1941/42 и 1942/43 гг. по 85-километровой дороге, проложенной по льду Ладожского озера, было перевезено более 500 тыс. т грузов, не считая эвакуируемых из блокадного Ленинграда людей.

Во второй половине XX в. с развитием сети гидрометеорологических станций в Арктике и открытием научных станций в Антарктиде морской припайный лед часто использовался для выгрузки судов и доставки грузов на берег (Припай, 1977). Этот опыт был учтен в 1970–1980-х гг. при разработке в Советском Союзе и в Российской Федерации целой серии нормативных документов и инструкций по выгрузке судов на припайный лед для морских судов, гидрографических и гидрометеорологических служб, экспедиций, подготовки ледовых дорог общего пользования. Эти документы, практически без изменений, широко используются и в настоящее время (Правила, 1983; РД 31.82.07-88; РД 31.89.01-89; РД 31.31.52-89; РД 31.81.10-91; ОДН 218.010-98).

#### ЯМАЛЬСКИЕ ГРУЗОВЫЕ ОПЕРАЦИИ

Для освоения открытых в 1960–1970-х гг. на п-ове Ямал газовых месторождений (в их числе гигантское Бованенковское нефтегазоконденсатное месторождение, Харасавэйское газоконденсатное месторождение и др.) потребовалось организовать регулярную доставку строительных грузов и техники на полуостров, не имеющий железных и автомобильных дорог, где речная и прибрежная навигация из ближайшего речного порта Салехард, расположенного на р. Оби, ограничена 70–110 днями безледного сезона.

Существенно увеличить грузопоток на Ямал можно было с использованием морских судов по трассе Северного морского пути. Ледокольное обеспечение позволяло использовать трассу Архангельск/Мурманск — западное побережье полуострова Ямал практически круглогодично. Основным ограничением являлась организация выгрузки судов. В безледный период выгрузка осуществлялась на рейде с использованием барж. Однако из-за частых штормов, постоянного волнового наката у берега процесс выгрузки затягивался. Кроме того, эффективность летней выгрузки сильно снижалась по причине интенсивного замыва значительной части груза песком в местах складирования в приурезовой зоне, поскольку в летний период отвоз грузов в глубь полуострова значительно затруднен.

В ледовый сезон выгрузка могла производиться на припайный лед, который уже в феврале в стадии однолетнего льда средней толщины достигал изобат 10–20 м. Это позволяло ставить морские суда с осадкой 9–12 м в припай и использовать технику для транспортировки грузов по льду от судна до берега.

Проведение зимне-весенних навигаций с выгрузкой на участке ямальского побережья, расположенного между мысом Харасавэй и отмелью у мыса Бурунный, получивших наименование «ямальские операции», началось еще в марте–апреле 1976 г. с экспериментального рейса дизель-электрохода «Павел Пономарев» под проводкой атомного ледокола «Ленин». 11 апреля 1976 г. «Павел Пономарев» подошел к рекомендованной точке выгрузки и приступил к разгрузке через припай на берег. Впервые в истории освоения Северного морского пути арктическая навигация в югозападной части Карского моря была открыта в такие ранние сроки. Первый же рейс показал преимущество зимней выгрузки перед летней рейдовой выгрузкой, ускорив обычные нормы рейдовой выгрузки судов более чем в три раза (Чилингаров, 1979).

С конца 1970-х до середины 1990-х гг. грузовые операции с выгрузкой на припайный лед в районе Харасавэя носили регулярный характер. На Ямал доставлялись строительные материалы, техника, оборудование, топливо. Обратно вывозились газовый конденсат, металлический лом. В период расцвета ямальских операций за одну зимнюю навигацию перевозилось до 100 тыс. т различных грузов.

Специализированное гидрометеорологическое обеспечение грузовых операций в то время выполняло Амдерминское управление гидрометслужбы с привлечением специалистов Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ), который имел большой опыт ранних выгрузок на припай в различных арктических пунктах (Новая Земля, ЗФИ). Гидрометеорологическое обеспечение ямальских операций включало в себя определение оптимальных сроков их проведения, осуществление постоянных наблюдений за ледовыми условиями по маршруту плавания в юго-западной части Карского моря и за состоянием припая непосредственно в районе Харасавэя, составление долгосрочных и краткосрочных метеорологических и ледовых прогнозов, разработку рекомендаций по выбору мест выгрузки на лед (грузовых площадок) с учетом безопасных глубин и толщины льда, разработку рекомендаций по подготовке ледовых дорог, контроль состояния льда и ледовых дорог в период грузовых работ. Инженерную подготовку ледовых дорог на припае и транспортировку грузов по льду обеспечивала Карская нефтегазоразведочная экспедиция, располагавшая большой базой и техническим парком в поселке Харасавэй.

В середине 1990-х гг. по экономическим причинам ямальские операции с выгрузкой на припай практически прекратились.

# СОВРЕМЕННЫЕ МОРСКИЕ ОПЕРАЦИИ С ВЫГРУЗКОЙ НА ПРИПАЙНЫЙ ЛЕД

Возобновление зимних навигаций на западном побережье Ямала было связано с планами «Газпрома» по скорейшему освоению месторождений полуострова, и в первую очередь — Бованенковского. Эта задача вновь потребовала значительного увеличения грузоперевозок, что могло быть быстро достигнуто с возобновлением зимних навигаций с выгрузкой на припайный лед. Заказчиками новых ямальских грузовых операций выступили строительные организации — подрядчики Ямальского газопромыслового управления ООО «Газпром добыча Надым». Инициатором зимней морской выгрузки 2007 г. было ЗАО «Трест Ямалстройгаздобыча». В навигацию 2008 г. зимне-весеннюю доставку груза заказывали уже три компании: ООО «Стройгазконсалтинг», ЗАО «Трест Ямалстройгаздобыча» и ООО «Севергазмонтаж».

Доставка генеральных грузов осуществлялась судами Северного морского пароходства, топлива — танкерами Мурманского морского пароходства. Ледовую проводку выполняли атомные ледоколы «50 лет Победы», «Вайгач» и «Таймыр». Постановку судов в припай для выгрузки обеспечивали мелкосидящие атомные ледоколы «Вайгач» (2007 г.), «Таймыр» (2009 г.) и дизель-электрический ледокол «Капитан Николаев» (2008 г.).

Специализированное гидрометеорологическое обеспечение зимне-весенних грузовых операций производилось специалистами ААНИИ. Инженерную подготовку ледовых дорог и грузовых площадок осуществляли подразделения береговой механизации компаний-грузополучателей.

В апреле-мае 2007 г. через ледовый припай в районе Харасавэя было разгружено 4 сухогруза дедвейтом 6 800 т и танкер «Варзуга» дедвейтом 15 748 т. В апреле-мае 2008 г. разгружено 5 сухогрузов и 2 танкера (рис. 1, рис. 2 цвет. вклейки). В марте-мае 2009 г. было разгружено 2 сухогруза и 3 танкера. После 2009 г. зимне-весенние выгрузки на Харасавэе прекратились и основной объем грузоперевозок для Бованенковского месторождения был перенесен на открывшуюся в 2010 г. железную дорогу Обская – Бованенково.

Начиная с 2010 г. на полуострове Ямал активизировалась деятельность ОАО «Новатэк» по строительству завода по сжижению природного газа, ориентированного, в первую очередь, на Южно-Тамбейское газоконденсатное месторождение. В качестве места строительства завода СПГ была выбрана Сабетта — вахтовый поселок в северной части Обской губы. В результате деятельность научно-оперативной группы



Рис. 1. Выгрузка судна на припай в районе Харасавэя, 2008 г.

ААНИИ по обеспечению зимних навигаций была перенесена с западного побережья Ямала на северо-восточное — в Обскую губу. Заказчиком зимне-весенних навигаций выступила дочерняя компания «Новатэка» ОАО «Ямал СПГ», которой принадлежит лицензия на Южно-Тамбейское месторождение. В апреле 2011 г. на припай в районе Сабетты был разгружен сухогруз «Капитан Данилкин» типа СА-15 Супер Мурманского морского пароходства. Весной 2012 г. «Капитан Данилкин» снова доставил груз в Сабетту, однако грузовая площадка была перенесена на 30 км южнее в район мыса Поруй в связи с аномально мягкой зимой и отсутствием в районе Сабетты достаточно толстого льда на безопасных для подхода судна глубинах.

Интенсивность зимней навигации с доставкой грузов в Сабетту значительно выросла в 2013 г. На ледовой площадке, подготовленной ОАО «Ямал СПГ» при участии специалистов ААНИИ, в период с 26 марта по 29 апреля были приняты и разгружены 3 сухогруза. Отдельную ледовую площадку в районе строящегося порта подготовило собственными силами ОАО «МРТС». На этой площадке было разгружено еще одно судно.

По мере строительства морского порта и ввода в строй части причалов морская доставка грузов в Сабетту с 2013 г. идет непрерывно. В зимних условиях суда швартуются к причальным стенкам при помощи мелкосидящего атомного ледокола. Разгрузка осуществляется кранами на гусеничном ходу, работающими с причала. Это позволяет разгружать суда, не оборудованные собственными грузоподъемными механизмами, что, в свою очередь, увеличивает суммарный дедвейт флота, используемого для доставки грузов в Сабетту.

По ряду причин начало круглогодичной причальной обработки грузов не отменило выгрузки на припай в районе Сабетты. Продолжение строительных работ в порту и непосредственно на причалах вынужденно тормозит разгрузку. В связи с этим в апреле-мае 2014 г. припайные операции продолжались, их планируется проводить и в дальнейшем.

Большие перспективы применения выгрузок на припайный лед намечаются для задач освоения арктических территорий в интересах Министерства обороны РФ. Объекты, расположенные на всем протяжении от Баренцева до Чукотского моря, должны быть введены в строй в кратчайшие сроки. В рамках этих задач в начале июня 2014 г. был разгружено на припай о. Котельный Новосибирских островов судно-снабженец «Иван Папанин». В 2015 г. география выгрузок на припай для оборонных целей обещает существенно расшириться.

# СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГРУЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ НА ПРИПАЙНОМ ЛЬДУ

Успешность грузовых операций с выгрузкой судов на припайный лед во многом зависит от качественного гидрометеорологического обеспечения. Если большая часть задач, связанных с подготовкой и проведением зимне-весенних навигаций, решается и просчитывается силами логистических отделов компаний-заказчиков работ с привлечением транспортных и строительных компаний, то специализированное гидрометеорологическое обеспечение навигаций осуществляется ледовыми специалистами из организаций гидрометеорологического профиля. В основных чертах это обеспечение как в ходе ямальских операций 1970–1990 гг., так и в последние годы практически не изменялось. Небольшие различия связаны с возросшими возможностями спутникового мониторинга и усовершенствованием методов полевых наблюдений за характеристиками льда. Приведем основные задачи специализированного обеспечения в том виде, в каком они реализуются в настоящее время.

Мониторинг ледовых условий в районе выгрузки начинается в период устойчивого появления льда и включает в себя сбор и анализ спутниковых снимков низкого разрешения, метеорологической информации с ближайших к интересующему району полярных станций.

Составление долгосрочного прогноза развития ледовых процессов в районе выгрузки производится на основе существующей информации по ледовому режиму района и данным текущего мониторинга. Долгосрочный прогноз используется при предварительном планировании навигации, определении ее оптимальных сроков. Как правило, предварительный прогноз составляется в декабре–январе. В последующие месяцы по необходимости выпускаются уточненные прогнозы.

Заказ, получение и дешифрирование спутниковых снимков высокого разрешения по району выгрузки производится непосредственно перед выездом научно-оперативной группы в район работ. Обычно заказываются радиолокационные снимки, не зависящие от облачности над акваторией. По снимкам высокого разрешения и навигационным картам определяются глубины моря, до которых распространяется припай, выделяются районы, наиболее перспективные для поиска ровных грузовых площадок для постановки судов под выгрузку. На основании снимков высокого разрешения дается предварительное заключение о достаточном развитии припая для подготовки транспортно-грузовой операции.

Ледовая разведка выполняется силами научно-оперативной группы сразу после прибытия ее в район выгрузки. В зависимости от сложности ледовой обстановки разведка выполняется с использованием вертолета либо в ходе рекогносцировочного объезда припая на снегоходах. В ходе разведки картируется ледовая обстановка, выбираются участки льда, пригодные для организации грузовых площадок для выгрузки судов, предварительно намечаются маршруты транспортировки грузов по льду на берег. Для грузовых площадок выбираются большие участки ровного льда на глубинах, достаточных для подхода груженого судна (обычно 10–12 м), с толщиной льда, обеспечивающей требуемую грузоподъемность. Горизонтальные размеры площадки должны быть достаточны для захода в нее судна на всю длину корпуса и маневров грузовых транспортных средств у борта судна. Количество грузовых площадок зависит от того, сколько судов планируется разгружать, в том числе одновременно. По результатам ледовой разведки дается заключение о принципиальной возможности выгрузки судов на припайный лед.

Выбор и промер маршрутов транспортировки грузов по льду. После определения грузовых площадок намечаются маршруты будущих ледовых дорог. При прокладке маршрутов научно-оперативная группа руководствуется требованием обеспечить минимальную протяженность движения по льду, но при этом старается обходить участки с большой высотой торосов, выбирает наиболее безопасные проходы через ледовые барьеры, гряды торосов, переезды через приливные трещины. Выполняется ледомерная съемка всех маршрутов с определением толщины льда, высоты снега и глубины моря с дискретностью не реже 100 м. Количество маршрутов зависит от возможностей береговой механизации по расчистке ледовых дорог. Например, при ширине расчищенной от снега и торосов дороги не менее 100 м достаточно одной ледовой дороги. При ширине 20-30 м расчищаются отдельные дороги для движения от берега к судну и обратно. При ширине 8-10 м обычно прокладывают не менее трех маршрутов: один от берега к судну для техники без груза и два маршрута от судна к берегу для груженой техники. В ходе эксплуатации дороги для груженой техники используются поочередно (например, через сутки) для того, чтобы дать льду «отдохнуть» после тяжелой и продолжительной нагрузки. Промеренные маршруты маркируются флажками, особо выделяются опасные участки (трещины, участки с пониженной толщиной льда и т.п.). По результатам промеров научно-оперативная группа готовит рекомендации и инструкции для береговой механизации по инженерной подготовке и оборудованию ледовых дорог и грузовых площадок. Ледовые дороги расчищаются бульдозерами и затем выравниваются грейдерами. Опасные трещины перекрываются металлическими или деревянными мостами-настилами. В течение всего времени эксплуатации дороги поддерживаются в расчищенном состоянии при помощи шнекоротора. От качества подготовки ледовых дорог во многом зависят скорость выгрузки и безопасность транспортировки грузов.

Определение грузоподъемности ледяного покрова. Грузоподъемность ледяного покрова определяется в соответствии с (Правила..., 1983) по данным измерений толщины, солености льда, температуры воздуха. В целях дополнительного контроля состояния льда выполняется визуальная оценка его строения (текстура льда), измерение температуры, плотности и прочности льда при изгибе. Рассчитываются предельная и рекомендуемая (с запасом прочности) грузоподъемности льда, время безопасной стоянки на льду, безопасные скорость и интервал движения. Для повышения грузоподъемности льда обычно использовался метод естественного намораживания льда снизу, когда после заблаговременной расчистки ледовых дорог от снега в течение 0,5–1 месяца до прихода судов происходило ускоренное нарастание толщины бесснежного льда.

Обеспечение краткосрочными метеорологическими прогнозами. Постоянная работа людей и техники на льду требует постоянного обеспечения метеопрогнозами. Для повышения качества и оправдываемости прогнозов силами научно-оперативной группы выполняется комплекс стандартных метеонаблюдений. Ежедневно метеосводки отправляются специалистам-синоптикам в ААНИИ, откуда поступает прогноз на трое суток.

Консультации капитанов ледоколов и грузовых судов по постановке в припай. При подходе каравана научно-оперативная группа устанавливает связь с судами и консультирует капитанов ледокола и сухогрузов по подходу к грузовой площадке и по всем процедурам постановки судов под разгрузку, осуществляет помощь в заведении ледовых якорей. Для более удобной ориентировки капитанов на льду из техники и подручных средств сооружаются временные створные знаки. В ночное время в качестве створных огней используются фары снегоходов. Перед началом грузовых работ капитану грузового судна и представителю грузополучателя передается комплект документов, предусмотренный правилами техники безопасности при проведении грузовых операций на припае (карта ледовой обстановки, схема дорог, результаты промеров, расчеты грузоподъемности льда, график движения техники по льду).

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗИМНЕ-ВЕСЕННИХ ГРУЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ

Зимне-весенние навигации с выгрузкой на припай большого количества грузов требуют координации самых различных организаций и служб, точного соблюдения графиков работ. Эффективность навигации зависит от своевременной поставки грузов в порты отгрузки, своевременного фрахта судов, ледокольного обеспечения, заблаговременной и качественной подготовки грузовых площадок и ледовых дорог. Логистические работы начинаются заранее, когда формирование припая находится на ранних стадиях и невозможно быть полностью уверенным в том, что ледовые условия позволят осуществить выгрузку на лед. В этих условиях грамотно организованное специализированное гидрометеорологическое обеспечение позволяет снизить риски и более эффективно планировать все этапы навигации.

Можно привести пример 2009 г., когда припай в районе Харасавэя в феврале был неожиданно оторван штормовым ветром перед самым выездом научно-оперативной группы в район работ. Тем не менее выгрузка состоялась на обнаруженный в 10 км южнее небольшой участок припайного льда, удержавшийся во время шторма благодаря большому количеству стамух. Другой пример был в 2012 г., когда в районе Сабетты в ходе аномально мягкой зимы так и не сложились ледовые условия, позволяющие разгружать суда на припай. После анализа спутниковых снимков и нескольких ледовых разведок был найден подходящий для выгрузки участок припая в 30 км южнее поселка, и выгрузка, хотя и со значительными трудностями, состоялась.

При нормальных ледовых условиях и правильно организованной заблаговременной подготовке грузовой операции скорость разгрузки судов на необорудованный берег через припай составляет 1000 т/сут, что сопоставимо со скоростью портовых погрузо-разгрузочных работ. В условиях малых глубин как на западном, так и на восточном побережье Ямала плечо транспортировки грузов по льду имеет длину 3–6 км. Указанная скорость выгрузки достигалась при круглосуточной организации работ и одновременной работе не менее двух судовых кранов (стрел). Для этого желательно, чтобы судно смогло заколоться в припай с возможностью одновременной разгрузки на два борта.

Важным фактором, влияющим на скорость и безопасность грузовых операций, является наличие опытных специалистов береговой механизации, имеющих опыт работы на льду, достаточного количества спецтехники (средних и легких бульдозеров, грейдеров, шнекороторных машин, автокранов, грузовых автомобилей).

# СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МОРСКИХ ОПЕРАЦИЙ С ВЫГРУЗКОЙ НА ПРИПАЙ

Развитие современных технологий закономерно повышает качество специализированного обеспечения морских ледовых операций. Спутниковые снимки с высоким разрешением упрощают планирование маршрутов облетов с ледовой авиаразведкой, а в некоторых случаях позволяют полностью отказаться от использования авиации, что снижает затраты на проведение данных работ. Повышается качество метеорологических и ледовых прогнозов.

В то же время инженерное обеспечение работ на льду практически осталось на уровне 70–90-х годов прошлого века, а в использовании специальных технических средств наблюдается определенная деградация. Основная работа по расчистке льда выполняется тяжелой техникой, предназначенной для дорожных работ на суше: бульдозерами, фронтальными погрузчиками, грейдерами. Большая удача, если в пункте выгрузки оказывается шнекоротор. Использование сухопутной дорожной техники на льду природных водоемов и особенно на морском льду требует от машинистов особых навыков, которые приобретаются только на практике. Эта техника не оборудована для безопасной работы на льду (имеет большой вес, отрицательную плавучесть и т.п.). Бульдозерная расчистка сопровождается созданием по краям ледовых дорог отвалов из снега и ледяных обломков, которые вызывают дополнительные деформации льда и образование трещин. Специальные машины, разработанные для ледовых работ еще в советское время (Богородский и др., 1983), можно встретить только на иллюстрациях публикаций тех лет.

Методики расчета грузоподъемности льда остаются на уровне расцвета ледотехники времен СССР. На том же уровне остались нормативные документы, регламентирующие грузовые и транспортные операции на льду. Развитие в данном направлении происходит исключительно за счет накопления личного опыта специалистами, участвующими в работах на льду. В частности, в руководящих документах отсутствуют указания на ограничения нагрузки на лед в районе приливных трещин в период сизигии и ветровых нагонов, отсутствуют критерии для оценки степени снижения грузоподъемности ледяного покрова при интенсивных циклических нагрузках, не рассматривается применение технологий искусственного ослабления льда, облегчающих заколку судов и уменьшающих разрушение льда непосредственно у борта (пропилы во льду под корпус судна). Все эти и многие другие вопросы требуют изучения, развития и внедрения в практику для повышения безопасности и эффективности использования ледяного покрова в задачах логистики в стране, которая имеет самое протяженное арктическое побережье.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*БогородскийВ.В., Гаврило В.П., Недошивин О.А.* Разрушение льда. Методы, технические средства. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 120 с.

Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации ледовых переправ: ОДН 218.010-98. М.: Федер. дорож. служба России, 1998. 40 с.

Песчанский И.С. Ледоведение и ледотехника. Л.: Гидрометеоиздат. 1967. 462 с.

Правила безопасности труда при производстве гидрографических, лоцмейстерских и других работ в Арктике: РД 31.89.01-89. М-во морского флота СССР. М.: Мортехинформреклама, 1991. 147 с.

Правила по технике безопасности при производстве наблюдений и работ на сети Госкомгидромета. Л: Гидрометеоиздат, 1983. 316 с.

Правила техники безопасности на судах морского флота: РД 31.81.10-91. Минтранс РФ. М.: Мортехинформреклама, 1992. 184 с.

Припай Восточной Антарктиды / Под. ред. В.В. Панова, В.И. Федотова. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. Тр. САЭ. Т. 63. 129 с.

Рекомендации по проектированию, строительству и эксплуатации ледяных причальных сооружений: РД 31.31.52-89. М-во морского флота СССР. Л.: 1989. 128 с.

Типовая инструкция по безопасности технологических схем погрузочно-разгрузочных работ на необорудованном берегу и во льдах берегового припая: РД 31.82.07-88. М-во морского флота СССР. М.: Мортехинформреклама, 1988. 36 с.

*Чилингаров А.Н.* Научно-оперативное гидрометеорологическое обеспечение зимне-весенних плаваний к п-ву Ямал. М.: Гидрометеоиздат, 1979. 12 с. (ВДНХ СССР. Павильон «Гидрометслужба СССР»)

## N.V. KUBYSHKIN, YU.P. GUDOSHNIKOV

# ACTUALIZATION OF THE TECHNOLOGIES OF CARGO TRANSSHIPMENT ACROSS FAST ICE

The modern approach to engineer support of fast ice unloading security and transportation of cargo is considered in the article. The experience of similar operations in Russian Arctic and use of modern technologies for their enlargement is also considered.

Keywords: ice cover, physical and mechanical properties, cargo operations, security, arctic seas.

№ 3 (105)

УДК 550.837.76

Поступила 19 февраля 2015 г.

# ДВУХПОЗИЦИОННЫЕ ЗОНДИРОВАНИЯ В ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ: ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА

д-р геол.-минерал. наук С.В. ПОПОВ<sup>1</sup>, канд. геол.-минерал. наук М.П. КАШКЕВИЧ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> — Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург, e-mail: spopov67@yandex.ru

<sup>2</sup> — Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, e-mail: m.kashkevich@spbu.ru

В настоящей работе рассматриваются теоретические аспекты однопозиционных и двухпозиционных зондирований. Особое внимание уделяется случаю, когда расстояние до лоцируемых объектов сравнимо с расстояниями между антеннами (при двухпозиционных зондированиях). Выяснено, что для названных условий вычисления, выполняемые по методике однопозиционных зондирований, вносят дополнительные погрешности. При двухпозиционных зондированиях расчеты, основанные на энергетических характеристиках, затруднены и неточны. Методика двухпозиционных зондирований, в отличие от однопозиционных, при прочих равных условиях позволяет локализовать изучаемые объекты.

*Ключевые слова:* георадиолокация, двухпозиционные зондирования, обработка георадарных данных.

### введение

Условия применимости той или иной модели определяются степенью значимости отклонения расчетной величины от ее истинного значения. При авиационных и наземных радиолокационных исследованиях, проводимых в Арктике, Антарктиде и



Рис. 1. Техническое оснащение современных отечественных наземных радиолокационных исследований: *а* — научный санно-гусеничный поход, Восточная Антарктида (январь 2009 г.); *б* — опытно-методические георадарные работы на карьере «Новинка», Ленинградская обл. (ноябрь 2011 г.). Фото С.В. Попова.

на горных ледниках большой мощности, вопрос об использовании модели однопозиционных зондирований не ставился даже в том случае, когда приемная и передающая антенны разнесены (рис. 1*a*), что характерно для данного вида работ (Богородский и др., 1983; Мачерет, 2006; Попов и др., 2003; Crary, Robinson, 1962; GSSI, 2014; Ророv, Leitchenkov, 1997; Studinger et al., 2003). Очевидность корректного использования однопозиционной модели обусловлена тем, что расстояние между антеннами на несколько порядков меньше расстояний до объектов зондирования. Однако применительно к георадиолокации — сравнительно новому геофизическому методу, бурно развивающемуся в последние десятилетия (Владов, Старовойтов, 2004; Вопросы подповерхностной радиолокации, 2005; Изюмов и др., 2008), ответ на поставленный вопрос не является очевидным.

На российском рынке хорошо известны отечественные георадары серий «Лоза», «ОКО» и «ОКО-2», «ГЕО», «ГРОТ» и ряд других. При зондировании грунта и ледников хорошо зарекомендовали себя американские георадары GSSI (Geophysical Survey Systems Inc.). Как следует из технических описаний, многие из них, если не большинство (особенно относительно низкочастотные), имеют разнесенные приемные и передающие антенны, особенно для относительно низкочастотного зондирования. В частности, расстояния между ними для приборов «ОКО-2» АБ-400 (рис. 16) и АБДЛ «Тритон» составляют 35 см и 135 см соответственно. При этом предельная глубина зондирования в условиях средней полосы России составляет около 5 м для первого из них и около 20 м для второго (Радиотехнический прибор..., 2009). Антенны 16-80 МГц GSSI являются полностью разнесенными (GSSI, 2014). Таким образом, глубина залегания рефлекторов, регистрируемых на временных радиолокационных разрезах, полученных с помощью вышеназванных приборов и их аналогов, сравнима с расстоянием между антеннами. В этом случае обработка полученных данных, исходя из модели однопозиционных зондирований, может привести к существенным ошибкам построения глубинного разреза.

Имеется еще один источник ошибок. Для построения глубинного разреза на основе временного необходимо знать кинематические параметры лоцируемых сред. При отсутствии априорной информации их можно получить двумя путями: (1) посредством выполнения наклонных зондирований и (2) расчетами на основе анализа дифрагированных волн от локальных объектов. Первый способ достаточно трудоемок и требует дополнительной подготовки, а иногда и специальной аппаратуры (Богородский и др., 1983; Popov et al., 2003). Второй значительно проще. Он основан на обработке годографов отраженных волн от локальных объектов (Изюмов и др., 2008; Попов, 2002). Опыт показывает, что практически на любом временном радиолокационном разрезе имеются подобные объекты, пригодные для расчетов (т.е. достаточно протяженные и уверенно прослеживаемые). Именно по этой причине данный метод пользуется заслуженной популярностью. С другой стороны, расчет кинематических параметров по неверной модели приведет не только к неправильному определению глубинного положения рефлекторов, но, что гораздо важнее, — к неверному определению диэлектрической проницаемости, а значит, и к неверному истолкованию разреза с позиций геологии.

В настоящей работе приводится сравнение моделей однопозиционных и двухпозиционных зондирований и условий, при которых возможно использование первой из них вместо второй.

### УСЛОВИЯ УПРОЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ ГЕОРАДАРНЫХ ДАННЫХ

Выясним условия, при которых, в ходе обработки георадарных данных, расстоянием между антеннами можно пренебречь и тем самым упростить расчеты. Пусть для большей наглядности имеются однородные и изотропные среды с диэлектрическими проницаемостями  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ . Они разделены горизонтальной границей, залегающей на глубине *H*. Георадар, осуществляющий двухпозиционные зондирования, располагается на поверхности первой среды (рис. 2). В соответствии с лучевым приближением (Никольский, 1973), расстояние от антенны до рефлектора *L* таково, что

$$L = \sqrt{H^2 + b^2} , \qquad (1)$$

где 2*b* — расстояние между антеннами (база).



Рис. 2. Схема распространения электромагнитных волн в среде с плоско-горизонтальными границами раздела при двухпозиционных зондированиях.

При выполнении георадарных исследований формируются временные радиолокационные разрезы, на которых каждому расстоянию до объекта-рефлектора *L* соответствует временная задержка т, зависящая от диэлектрической проницаемости среды є. Если *с* — скорость света в вакууме, то глубинный разрез может быть пересчитан во временной, пользуясь соотношением (Богородский и др., 1983; Мачерет, 2006):

$$\tau = 2L\sqrt{\varepsilon} / c . \tag{2}$$

Согласно выражениям (1) и (2), отражение на временном радиолокационном разрезе, соответствующее границе раздела сред, располагается на дальности  $\tau_m$  (рис. 2),

$$\tau_{tp} = 2 \frac{\sqrt{\varepsilon_1}}{c} \sqrt{H^2 + b^2}.$$
(3)

Если обработка данных осуществляется по методике однопозиционной съемки, то кажущаяся глубина залегания границы  $\tilde{H}$  определяется соотношением  $\tilde{H} = \sqrt{H^2 + b^2}$ . Разность между кажущейся и реальной глубинами ( $\Delta H_{12}$ ) составляет

$$\Delta H_{12} = (b^2 + H^2)^{1/2} - H.$$
(4)

На рис. 3 представлены результаты вычислений по соотношению (4) для различных значений b. Для наглядности они приведены в абсолютных (рис. 3a) и относительных (рис. 36) единицах. Из рисунка, в частности, следует, что реальные глубины залегания объектов меньше, чем кажущиеся.

Условия использования той или иной методики расчетов целиком зависит от конкретных задач. В частности, при выполнении инженерной съемки с целью выявления объектов и приблизительной оценки глубины их залегания, упрощенный



Рис. 3. Абсолютные (a) и относительные (б) величины разности истинной и кажущейся глубин залегания рефлектора при двухпозиционных зондированиях, обрабатываемых по методике однопозиционных.

подход однопозиционных зондирований вполне приемлем. С другой стороны, при проведении прецизионных исследований (например, в гляциологии и климатологии, с целью решения фундаментальных задач определения величины удельной аккумуляции посредством трассирования слоев в снежном покрове (Попов, 2003; Frezzotti et al., 2002, 2004)), расчеты по упрощенной методике будут неприемлемы при  $\Delta H_{12} > 10$  см. Исходя из этого, для георадара «ОКО-2» АБДЛ «Тритон» использование однопозиционного приближения дает результаты, пригодные для прецизионных работ, при зондировании объектов, расположенных на глубинах более 1,5 м (рис. 3).

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Помимо увеличения кажущейся глубины рефлектора, обработка данных георадара по упрощенной методике может привести к неверным выводам при анализе энергетических характеристик отраженного сигнала. Снова обратимся к рис. 2. Определим коэффициент отражения Френеля для зеркальной границы при двухпозиционных зондированиях  $R_{ip}$ . Если  $\theta$  — угол падения плоской волны, то, следуя (Никольский, 1973), после соответствующих преобразований получаем

$$R_{tp} = \frac{\varepsilon_2 \cos \theta - \sqrt{\varepsilon_1} \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \theta}}{\varepsilon_2 \cos \theta + \sqrt{\varepsilon_1} \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \theta}},$$

или, применительно к двухпозиционным зондированиям (рис. 2),

102



Рис. 4. Зависимость коэффициента отражения Френеля от глубины зондирования (*a*) и диэлектрической проницаемости сред (*б*) при двухпозиционных зондированиях.

$$R_{ip} = \frac{\varepsilon_2 H - \sqrt{\varepsilon_1} \sqrt{\varepsilon_2 \left(H^2 + b^2\right) - \varepsilon_1 b^2}}{\varepsilon_2 H + \sqrt{\varepsilon_1} \sqrt{\varepsilon_2 \left(H^2 + b^2\right) - \varepsilon_1 b^2}}.$$
(5)

На рис. 4*а* приведены кривые зависимостей коэффициента отражения Френеля от глубины зондирования при различных базах. Для определенности диэлектрические проницаемости верхней и нижней сред в расчетах составляют 15 (влажный песок (Радиотехнический прибор..., 2009)) и 65 (мокрый торф (Радиотехнический прибор..., 2009)) соответственно. Вычисления производились по соотношению (5). Из приведенных графиков следует, что для рассмотренных случаев результат расчетов коэффициента отражения на глубинах приблизительно до 1 м (для АБДЛ «Тритон» — до 1,5 м) зависит, главным образом, от соотношения глубины залегания границы и базы. Это означает, что производить какие-либо вычисления на основе энергетических характеристик отраженного сигнала при глубинах, меньших, чем названные, практического смысла не имеет.

На рис. 46 приведены зависимости коэффициента отражения Френеля от диэлектрической проницаемости верхней среды в случае, если нижней средой является вода ( $\varepsilon_2 = 80$ ), при различных базах. Расчеты также производились по соотношению (5). График показывает, что при значительных базах для глубин порядка 1 м ошибка оценки є среды в ряде случаев может составлять более 10 %.

## РАСЧЕТ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕД ПО ДИФРАГИРОВАННЫМ ВОЛНАМ

При георадарных исследованиях особенно важно знание кинематических характеристик лоцируемых сред. Без этого в конечном счете невозможен корректный

пересчет временно́го разреза в глубинный. Одним из наиболее простых и действенных методов является определение названных параметров по гиперболическим отражениям от локальных объектов-рефлекторов для случая однородной изотропной среды (Изюмов и др., 2008; Попов, 2002).

Сравним результаты, получаемые при однопозиционных (Попов, 2002) и двухпозиционных зондированиях. Сначала рассмотрим первые из них. Если H— глубина залегания рефлектора, D— латеральное расстояние от рефлектора до маршрута и  $x_i$ — расстояние по маршруту, то для однопозиционных зондирований (рис. 5), получаем следующие выражения (Попов, 2002):

$$L_0^2 = H^2 + D^2 , (6)$$

$$L_i^- = H^- + D^- + x_i^-$$
или  
 $L_i^2 = L_0^2 + x_i^2$ . (7)

С учетом (2), уравнения (6) и (7) примут вид

$$\tau_0^2 = 4\epsilon / c^2 (H^2 + D^2) \,_{\rm H} \tag{8}$$

$$\tau_i^2 = \tau_0^2 + \frac{4\varepsilon}{c^2} x_i^2 \,, \tag{9}$$

где  $\tau_0$  и  $\tau_i$  — временные задержки отраженного сигнала, соответствующие вершине гиперболического отражения и ее ветвям. Таким образом, соотношение (9) является уравнением годографа гиперболического отражения от локального объекта при однопозиционных зондированиях в однородной изотропной среде.

Обратимся к съемке, выполняемой по методике двухпозиционных зондирований. Применительно к реальной аппаратуре, имеется всего два варианта расположения антенн по отношению к маршруту следования, а значит, и к рефлектору. Один из них предполагает «ортогональное» расположение, при котором антенны находятся по обе стороны от линии маршрута (рис. 1a); другой — «параллельное», при котором антенны двигаются по маршруту одна за другой (рис. 16). Соответственно, имеются два варианта формирования гиперболического отражения на временном радиоло-кационном разрезе. Оба они показаны на рис. 5. Там же показаны и обозначения, принятые в нижеследующих расчетах.



Рис. 5. Схема распространения электромагнитных волн от локального объекта при однопозиционных и двухпозиционных зондированиях.

При двухпозиционных зондированиях с параллельным расположением антенн (рис. 5)  ${}^{\parallel}L_{01} = {}^{\parallel}L_{02} \equiv {}^{\parallel}L_{0}$ . Тогда:

$${}^{\parallel}L_{0}^{2} = L_{0}^{2} + b^{2} \quad \mathbf{M}$$

$${}^{\parallel}L_{i2}^{2} = \left[\sqrt{L_{0}^{2} + (x_{i} - b)^{2}} + \sqrt{L_{0}^{2} + (x_{i} + b)^{2}}\right]^{2}.$$
(10)

После раскрытия скобок, возведения в квадрат и последующих упрощений получаем:

$$\left( {}^{\parallel}L_{i1} + {}^{\parallel}L_{i2} \right)^2 = 2 \left[ {}^{\parallel}L_0^2 + x_i^2 + \sqrt{{}^{\parallel}L_0^4 + 2 {}^{\parallel}L_0^2 x_i^2 + x_i^2 \left(x_i^2 - 4b^2\right)} \right].$$
(11)

С учетом (2) уравнения (10) и (11) примут вид

$${}^{\parallel}\tau_{0}^{2} = (4\varepsilon/c^{2}) {}^{\parallel}L_{0}^{2} = (4\varepsilon/c^{2})(H^{2} + D^{2} + b^{2})$$
 (12)

$${}^{\parallel}\boldsymbol{\tau}_{i}^{2} = \frac{{}^{\parallel}\boldsymbol{\tau}_{0}^{2}}{2} + \frac{2\varepsilon}{c^{2}}x_{i}^{2} + \frac{1}{2c^{2}}\sqrt{{}^{\parallel}\boldsymbol{\tau}_{0}^{2}c^{2}({}^{\parallel}\boldsymbol{\tau}_{0}^{2}c^{2} + 8\varepsilon x_{i}^{2}) + 16\varepsilon^{2}x_{i}^{2}\left(x_{i}^{2} - 4b^{2}\right)} \,.$$
(13)

При двухпозиционных зондированиях с ортогональным расположением антенн (рис. 5) формулы становятся несколько сложнее:

$$\left( {}^{\perp}L_{01} + {}^{\perp}L_{02} \right)^2 = \left[ \sqrt{H^2 + (D-b)^2} + \sqrt{H^2 + (D+b)^2} \right]^2 \mathbf{M}$$
$$\left( {}^{\perp}L_{i1} + {}^{\perp}L_{i2} \right)^2 = \left[ \sqrt{{}^{\perp}L_{01}^2 + x_i^2} + \sqrt{{}^{\perp}L_{02}^2 + x_i^2} \right]^2 .$$

После преобразований получаем:

 $( ||L_{i1} +$ 

$$({}^{\perp}L_{01} + {}^{\perp}L_{02})^{2} = 2(H^{2} + D^{2} + b^{2}) + 2\sqrt{H^{4} + 2H^{2}(D^{2} + b^{2}) + (D^{2} - b^{2})^{2}} \mathbf{H}$$
(14)  
$$({}^{\perp}L_{i1} + {}^{\perp}L_{i2})^{2} = 2(H^{2} + D^{2} + b^{2} + x_{i}^{2}) + + 2\sqrt{(D^{2} - b^{2})^{2} + (H^{2} + x_{i}^{2})(H^{2} + x_{i}^{2} + 2(D^{2} + b^{2}))} .$$
(15)

С учетом (2) уравнения (14) и (15) примут вид

$${}^{\perp}\tau_{0}^{2} = \frac{2\varepsilon}{c^{2}} \left[ H^{2} + D^{2} + b^{2} + \sqrt{H^{4} + 2H^{2}(D^{2} + b^{2}) + (D^{2} - b^{2})^{2}} \right]$$
 (16)

$${}^{\perp}\tau_{i}^{2} = \frac{2\varepsilon}{c^{2}} \left(H^{2} + D^{2} + b^{2} + x_{i}^{2}\right) + \frac{2\varepsilon}{c^{2}} \sqrt{\left(D^{2} - b^{2}\right)^{2} + \left(H^{2} + x_{i}^{2}\right)\left(H^{2} + x_{i}^{2} + 2\left(D^{2} + b^{2}\right)\right)}.$$
(17)

Таким образом, соотношения (13) и (17) являются уравнениями годографа для съемки по методике двухпозиционных зондирований. При b = 0 уравнения преобразуются в предельный случай однопозиционных зондирований (9).

Анализ рисунка 5 и уравнений (13) и (17) показывает, что для однопозиционных зондирований и двухпозиционных зондирований с параллельным расположением антенн вид гиперболических отражений, помимо  $\varepsilon$ , зависит только от расстояния до рефлектора, т.е. соотношение между H и D значения не имеет. Иначе дело обстоит с двухпозиционными зондированиями с ортогональным расположением антенн. При



Рис. 6. Кривые, соответствующие годографу от локального объекта, расположенного на различных расстояниях до антенн при  $\varepsilon = 7$ .

Утолщенной линией показаны графики, соответствующие однопозиционным зондированиям при постоянной глубине залегания объекта H = 2 м; тонкой линией — для двухпозиционных зондирований с параллельным расположением антенн при постоянной глубине залегания объекта H = 2 м; тонкой пунктирной линией — для двухпозиционных зондирований с ортогональным расположением антенн при постоянной глубине залегания объекта H = 2 м; тонкой пунктирной глубине залегания объекта H = 2 м; тонкой пунктирной глубине залегания объекта H = 2 м; тонкой штриховой линией — для двухпозиционных зондирований с ортогональным расположением антенн при постоянной глубине залегания объекта H = 2 м; тонкой штриховой линией — для двухпозиционных зондирований с ортогональным расположением антенн при постоянной глубине залегания объекта D = 2 м; номер секции — латеральное расстояние в метрах до объекта для первых трех линий и глубина залегания — для последней.

различных соотношениях между H и D форма отражений (а значит, и уравнение годографа) будет изменяться. Это непосредственно вытекает из уравнения (17) и рис. 5. Проиллюстрируем вышеизложенное.

Пусть, для определенности, имеется среда с  $\varepsilon = 7$  (песок средней влажности (Радиотехнический прибор..., 2009)), в которой на глубине H = 2 м располагается рефлектор. Будем выполнять профильную съемку всеми тремя изложенными выше способами таким образом, чтобы первый профиль пересекал рефлектор (D = 0 м), а следующие располагались на различных расстояниях D: 1, 2, 3, 4 и 5 м до него. Для определенности будем считать, что работы выполняются АБДЛ «Тритон» (база 2b = 135 см). Выполним съемку повторно таким образом, чтобы латеральное расстояние до рефлектора D было постоянным (D = 2 м), а изменялось лишь глубинное положение рефлектора H. Сначала объект будет располагаться на поверхности (H = 0 м), а затем на глубинах 1, 2, 3, 4 и 5 м. Если технические характеристики нашей аппаратуры (включая мощность зондирующего импульса и диаграмму направленности антенн) таковы, что в принципе позволяют получать уверенные отражения при названных условиях, то гиперболические отражения, наблюдаемые на временных радиолокационных разрезах, будут иметь форму, приведенную на рис. 6.

Из рисунка видно, что во всех случаях вид годографа различен и различно положение вершин гипербол. Кривые, соответствующие однопозиционным зондированиям, располагаются на меньших дальностях по сравнению с двухпозиционными при параллельном расположении антенн. Годографы, соответствующие двухпозиционным зондированиям с ортогональным расположением антенн, занимают промежуточное положение. При этом если латеральное отклонение от



Рис. 7. Годографы отражений от локального объекта, расположенного на одинаковом расстоянии до антенн при различных кинематических параметрах лоцируемых сред.

Утолщенной линией показаны графики, соответствующие однопозиционным зондированиям при H = 2 м и D = 1 м; тонкой линией — для двухпозиционных зондирований с параллельным расположением антенн при H = 2 м и D = 1 м; тонкой пунктирной линией — для двухпозиционных зондирований с ортогональным расположением антенн при H = 2 м и D = 1 м; тонкой штриховой линией — для двухпозиционных зондирований с ортогональным расположением антенн при H = 2 м и D = 1 м; тонкой штриховой линией — для двухпозиционных зондирований с ортогональным расположением антенн при H = 2 м и D = 1 м; тонкой штриховой линией — для двухпозиционных зондирований с ортогональным расположением антенн при H = 1 м и D = 2 м.

маршрута меньше, чем глубина положения рефлектора, то на меньших дальностях располагаются и сами кривые. При равенстве глубины залегания и латерального отклонения годографы совпадают.

Аналогичная ситуация наблюдается и при лоцировании сред с различными значениями  $\varepsilon$ . На рис. 7 приведены модельные кривые годографов, сформированных от локальных объектов, которые расположены на глубине H = 2 м и D = 1 м для всех рассмотренных видов съемок, а также при H = 1 м и D = 2 м для двухпозиционных зондирований с ортогональным расположением антенн. Рефлекторы находятся в средах с различными кинематическими параметрами. Расчеты производились в предположении использования АБДЛ «Тритон». Из рисунка следует, что, при прочих равных условиях, с ростом  $\varepsilon$  среды увеличивается расхождение между годографами, которые соответствуют различным видам съемок.

# ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ПОСРЕДСТВОМ ПРОВЕДЕНИЯ ДВУХПОЗИЦИОННЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Выполнение съемки по методике двухпозиционных зондирований, при необходимости, позволит точнее локализовать положение объекта, залегающего на относительно небольшой глубине. Выполним по одному и тому же маршруту съемку по методике двухпозиционных параллельных и ортогональных зондирований (рис. 5). Гиперболические отражения (при их наличии) описываются уравнениями (12), (13) и (17). Решим их относительно *H* и *D*. Вычтем (13) из (17). После преобразований, с учетом (12), получим

$${}^{\perp}\tau_{i}^{2} - {}^{\parallel}\tau_{i}^{2} = \frac{2\varepsilon}{c^{2}}\sqrt{\left(D^{2} - b^{2}\right)^{2} + 2\frac{{}^{\parallel}\tau_{0}^{2}c^{2}}{2\varepsilon}\left(H^{2} + x_{i}^{2}\right) - H^{4} + x_{i}^{4}} - \frac{1}{2c^{2}}\sqrt{\mathbb{A}}$$

где  $\mathbb{A} \equiv ||\tau_0^2 c^2 (||\tau_0^2 c^2 + 8\varepsilon x_i^2) + 16\varepsilon^2 x_i^2 (x_i^2 - 4b^2)$ . После возведения в квадрат и упрощений получим биквадратное уравнение относительно *H*:

107
$$H^{4} - H^{2} \frac{\|\boldsymbol{\tau}_{0}^{2}c^{2}}{2\varepsilon} + \left[\frac{c^{2}}{2\varepsilon}\left(^{\perp}\boldsymbol{\tau}_{i}^{2} - \|\boldsymbol{\tau}_{i}^{2}\right) + \frac{1}{4\varepsilon}\sqrt{\mathbb{A}}\right]^{2} - x_{i}^{4} - \left(D^{2} - b^{2}\right)^{2} - x_{i}^{2}\frac{\|\boldsymbol{\tau}_{0}^{2}c^{2}}{2\varepsilon}.$$
 (18)

Обратимся к уравнению (12). Выразим D<sup>2</sup> через остальные члены и подставим в (18). Раскроем скобки и упростим полученное выражение. Окончательно после преобразований получим:

$$H^{2} = \frac{1}{4b^{2}} \left( \frac{1}{4\epsilon^{2}} \left[ c^{2} \left( {}^{\perp}\tau_{i}^{2} - {}^{\parallel}\tau_{i}^{2} \right) + \frac{1}{2}\sqrt{\mathbb{A}} \right]^{2} - \left[ \frac{{}^{\parallel}\tau_{0}^{2}c^{2}}{4\epsilon} - 2b^{2} \right]^{2} - x_{i}^{2} \left[ x_{i}^{2} + \frac{{}^{\parallel}\tau_{0}^{2}c^{2}}{2\epsilon} \right] \right).$$
(19)

Подставив  $H^2$  из (19) в выражение для  $D^2$  из (12), получим значение  $D^2$ .

Таким образом, посредством выполнения двухпозиционных зондирований по одному и тому же маршруту сначала при параллельном расположении антенн, а затем при ортогональном можно определить глубину залегания объекта и латеральное расстояние до него.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, в рамках представленной работы выяснено, что при глубинах лоцирования, сравнимых с расстоянием между антеннами, вычисления, выполняемые по методике однопозиционных зондирований, вносят дополнительные погрешности. Величина последних относительно невелика, и пренебрежение ею зависит от конкретных задач работ. Скорее всего, при выполнении инженерной съемки с целью простого выявления объектов и приблизительной оценки глубины их залегания, обсчет данных вполне возможно осуществлять по упрощенной методике (однопозиционные зондирования). С другой стороны, при проведении прецизионных исследований, связанных с изучением близкозалегающих объектов, различия между рассмотренными моделями следует иметь в виду.

С другой стороны, современная аппаратура, предназначенная для георадарного профилирования, позволяет разносить антенны на расстояния до 10 м (Радиотехнический прибор..., 2009; GSSI, 2014). Это открывает большие перспективы в плане использования метода двухпозиционных зондирований с целью построения целевых границ с наибольшей точностью. Основная трудность заключается в том, что суммарный отраженный сигнал есть результат интерференции волн, пришедших с различных неизвестных направлений. Строго говоря, интерпретатор при обработке данных вынужден руководствоваться рядом допущений, в частности, что отражения от целевых границ сформированы вдоль линии профиля. Комбинированная методика однопозиционной и двухпозиционной съемки позволит уточнить истинное положение рефлекторов.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практические выводы из вышеизложенного состоят в следующем:

 – при георадарных исследованиях, в зависимости от задач работ, использование методики расчетов для однопозиционных зондирований при разнесенных антеннах могут быть неприменимы ввиду значительных искажений;

 при двухпозиционных зондированиях расчеты, основанные на энергетических характеристиках объектов, глубина залегания которых сравнима с расстоянием между антеннами, крайне затруднены и неточны;

 методика двухпозиционных зондирований, в отличие от однопозиционных, при прочих равных условиях позволяет локализовать объекты. Авторы признательны сотрудникам ПМГРЭ П.И. Луневу и РАЭ С.П. Полякову за рекомендации и конструктивную критику данной работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Богородский В.В., Бентли Ч.Р., Гудмандсен П.* Радиогляциология. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 308 с.

Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М.: Издательство МГУ, 2004. 153 с.

Вопросы подповерхностной радиолокации / Под ред. А.Ю. Гринева. М.: Радиотехника, 2005. 416 с.

*Изюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С.* Теория и методы георадиолокации: Учебное пособие. М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2008. 196 с. *Мачерет Ю.Я.* Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.

Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1973. 608 с.

Попов С.В. Определение средней скорости распространения электромагнитных волн в леднике по гиперболическим отражениям от неоднородностей // Мат-лы гляциолог. исследований. 2002. Вып. 92. С. 223–225.

Попов С.В. Применение ледовой локации для гляциологических исследований // Труды XX и XXI Всероссийских симпозиумов «Радиолокационное исследование природных сред». Вып. 3 / Под ред. М.Н. Марова, В.Д. Степаненко, Ю.А. Мельник, В.Г. Иванова. ВКА им. А.Ф. Можайского, 2003. С. 57–64.

Попов С.В., Шереметьев А.Н., Масолов В.Н., Лукин В.В. Основные результаты наземного радиолокационного профилирования в районе подледникового озера Восток в 1998–2002 гг. // Мат-лы гляциолог. исследований. 2003. Вып. 94. С. 187–193.

Радиотехнический прибор подповерхностного зондирования (reopaдap) «ОКО-2». Техническое описание. Инструкция по эксплуатации. М.: ООО «Логические системы», 2009. 94 с.

*Crary A.P., Robinson E.S.* Oversnow traverses from McMurdo to the South Pole // Science. 1962. Vol. 135. P. 291–295.

*Frezzotti M., Gandolfi S., Urbini S.* Snow megadunes in Antarctica: Sedimentary structure and genesis // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107(D18), 4344, doi:10.1029/2001JD000673.

*Frezzotti M., Pourchet M., Flora O., Gandolfi S., Gay M., Urbini S., Vincent C., Becagli S., Gragnani R., Proposito M., Severi M., Traversi R., Udisti R., Fily M.* New estimations of precipitation and surface sublimation in East Antarctica from snow accumulation measurements // Climate Dynamics. 2004. Vol. 23. P. 803–813. DOI 10.1007/s00382-004-0462-5.

GSSI Antennas Manual #MN30-903 Rev E. Geophysical Survey Systems, Inc., Salem, NH. 2014. 99 p.

Hagen J.O., Saetrang A. Radio-echo soundings of sub-polar glaciers with low-frequency radar // Polar Res. 1991. Vol. 9. № 1. P. 99–107.

Popov S.V., Leitchenkov G.L. Radio-echo sounding investigations of Western Dronning Maud Land and North-Eastern Coats Land, East Antarctica // Polarforschung. 1997. Vol. 67. № 3. P. 155–161.

Popov S.V., Sheremet'ev A.N., Masolov V.N., Lukin V.V., Mironov A.V., Luchininov V.S. Velocity of radio-wave propagation in ice at Vostok station, Antarctica // J. Glaciol. 2003, Vol. 49. № 165. P. 179–183.

Studinger M., Bell R., Karner G.D., Tikku A.A., Holt J.W., Morse D.L., Richter T.G., Kempf S.D., Peters M.E., Blankenship D.D., Sweeney R.E., Rystrom V.L. Ice cover, landscape setting and geological framework of Lake Vostok, East Antarctica // EPSL. 2003. Vol. 205. P. 195–210.

## S.V. POPOV, M.P. KASHKEVICH

## TWO-POSITION GPR SOUNDING: LIMITS AND POSSIBILITIES

Theoretical aspects of the one-position and two-position GPR technique are discussed in this paper. Particular attention is paid to the case when the distance to the objects is comparable to the distance between the antennas. It was found the calculations performed by one-position method follows to the extra error for these conditions. The calculations based on the energy performance for two-position GPR are difficult and not accurate. Two-position GPR technique allows to localize objects of investigation.

Keywords: GPR technique, two-position sounding, processing of GPR data.

#### № 3 (105)

# СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

УДК 91.(091); 91(092)

Поступила 28 августа 2015 г.

## ИМЕНА СОТРУДНИКОВ ААНИИ НА ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КАРТАХ. ИВАН ФЕДОРОВИЧ ПУСТОВАЛОВ, ВЛАДИМИР РУДОЛЬФОВИЧ САМОЙЛОВИЧ

#### д-р геогр. наук Л.М. САВАТЮГИН

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: savat@aari.ru

На севере залива Пуховый (о. Южный, арх. Новая Земля) находится бухта Пустовалова, названная в 1933 г. геологической экспедицией Всесоюзного арктического института (ВАИ) в честь исследователя Новой Земли, сотрудника ВАИ Ивана Федоровича Пустовалова (1904–1984), руководившего геолого-топографическими работами Западно-Новоземельской экспедиции ВАИ.

Иван Федорович Пустовалов. Родился

Иван Федорович в 1904 г. в крестьянской семье в Вологодской губернии. После окончания школы в 1923 г. поступил на геологическое отделение физико-математического факультета Ленинградского государственного университета. После окончания университета в 1929 г. был оставлен в аспирантуре при университете.

1 февраля 1933 г. Ленинградским горкомом ВКП (б) И.Ф. Пустовалов был направлен на

работу в Арктический институт Главсевморпути, в котором возглавил Западно-Новоземельскую экспедицию ВАИ, обследовавшую западное побережье о. Северный Новой Земли.

Первоклассный отчет об этих исследованиях был опубликован им в Бюллетене ВАИ за 1936 г. Несколько его статей появилось в Трудах Арктического института и журнале «Советская Арктика»: «Геологический очерк западного побережья Новой Земли (от Русской Гавани до залива Иностранцева)», «О находке нефти на северной оконечности Новой Земли», «Есть ли нефть на Новой Земле?» и другие. В 1937 г. он защитил кандидатскую диссертацию, а ученая степень кандидата геологоминералогических наук была присуждена ему в 1939 г.

Работа в Арктическом институте была прервана призывом в Красную Армию, где он красноармейцем-курсантом провел около восьми месяцев. Больше в Арктику И.Ф. Пустовалов не возвращался, работая на должностях геолога, старшего геолога, старшего научного сотрудника в ЦНИГРИ и ВСЕГЕИ вплоть до июля 1941 г.

> Практически с первых дней войны И.Ф. Пустовалов был на фронте, но воевать ему довелось только до августа 1941 г. Будучи раненным в боях на территории Эстонии, он попал в плен и до апреля 1945 г., до освобождения американскими войсками, находился в различных лагерях и рабочих командах в Эстонии, Польше, Германии, Франции (Эльзас-Лотарингия). После возвращения из плена И.Ф. Пустовалов избежал репрессий только

благодаря доценту Ленинградского горного института А.К. Маркову. На допросах в НКВД А.К. Марков подтвердил, что они с И.Ф. Пустоваловым участвовали в том бою, где И.Ф. Пустовалов был ранен и оставлен на поле боя.

В 1950–1957 гг. И.Ф. Пустовалов работал во ВСЕГЕИ, совмещая эту работу с преподаванием в ЛГИ. Вышел на пенсию в 1976 г. с должности заведующего отделом геологии и полезных ископаемых Запада.

Умер И.Ф. Пустовалов в 1984 г. в Ленинграде. Урна с прахом захоронена в колумбарии городского крематория.



И.Ф. Пустовалов

2015

На северо-западном побережье о. Северный арх. Новая Земля находится Володькина бухта, названная в честь исследователя Новой Земли Владимира Самойловича, сына Рудольфа Самойловича.

Владимир Рудольфович Самойлович. В связи с приближением Второго Международного полярного года (1932-1933 гг.) перед Всесоюзным арктическим институтом ставятся грандиозные задачи, главными из которых являются изучение арктических морей и создание на островах и побережье Северного Ледовитого океана новых полярных станций. Для решения этих задач в 1932 г. организуется комплексная экспедиции и в ее распоряжение выделяется одно из лучших судов Севера — ледовый пароход «Владимир Русанов», а Рудольф Лазаревич Самойлович назначается руководителем комплексной океанологической экспедиции 1932 г., ставшей одной из самых успешных по достигнутым результатам.

В эту экспедицию Рудольф Лазаревич (директор ВАИ) берет и своего 13-летнего сына Владимира. Когда л/п «Владимр Русанов» зашел в залив Русская Гавань (о. Северный, арх. Новая Земля), то в одной из бухт этого залива был установлен футшток для наблюдений за колебаниями уровня моря. Эти наблюдения были поручены Владимиру Самойловичу, который блестяще справился с этой задачей. Эта бухта впоследствии получила название Володькина бухта.

Родился Владимир Рудольфович Самойлович в 1919 г., его мать Елена Михайловна Ермолаева — старшая сестра Михаила Михайловича Ермолаева, выдающегося ученого-геолога и полярного исследователя.

Несмотря на то, что отец Владимира, профессор Р.Л. Самойлович 4 марта 1939 г. был осужден по обвинению «в измене Родине» и в тот же день расстрелян в Москве, Владимиру удалось получить высшее медицинское образование перед Великой Отечественной войной.

С первых же дней войны он был призван в РККА Петроградским РВК г. Ленинграда в звании военврач 3 ранга (эквивалент звания капитан) и сразу же направлен на передовую Ленинградского фронта. Уже 2 августа 1941 г. он был ранен. Подлечившись, снова был на передовой и ранен еще трижды (4 октября 1941 г., 16 апреля 1942 г., 26 сентября 1942 г.). В январе 1943 г. Владимира за участие в боях на Синявинском плацдарме представили к правительственной награде. Вот краткое описание его подвига (выписка из наградного листа): «Военврач 3 ранга Самойлович Владимир Рудольфович, неизменный бесстрашный участник боев полка, вместе с пехотой переправил свой передовой ПМП (полковой медицинский пункт) на левый берег р. Нева, где сразу же оказал помощь раненым. За 4 дня боев оказал помощь 600 тяжело раненным бойцам и командирам, отказывался от сна и отдыха. В бою лично принимал участие по эвакуации и помощи тяжело раненным бойцам и командирам.

Достоин представлению к правительственной награде орденом "Красной Звезды".

Командир 169 СП Смородкин. 21 января 1943 г.».

Однако в «Приказе частям 86-й стрелковой дивизии Ленинградского фронта» от 25 января 1943 г., подписанном командиром 86-й стрелковой дивизии, Героем Советского Союза, полковником В. Трубачевым, сказано, что «Военврач 3 ранга Самойлович Владимир Рудольфович, командир санитарной роты 169 стрелкового полка 86 стрелковой дивизии, награждается медалью "За боевые заслуги"».

Летом 1945 г. Владимир Самойлович по доносу (антисоветские разговоры) был арестован и исчез в ГУЛАГе.

Трагически сложилась и судьба родных Р.Л. Самойловича. Его арест коснулся даже членов его первой семьи, с которой он не жил более 20 лет. Дочери Софье Рудольфовне предложили переменить место работы. Нелегко было потом устроиться, повсюду от нее отворачивались. Ее сестра, Мария Рудольфовна, авиаинженер по образованию, была уволена из авиационной промышленности. Ей пришлось заново приобретать специальность в машиностроении.

Вторую жену Р.Л. Самойловича, Елену Михайловну, вместе с дочерью Наташей вывезли на Кубань, в годы войны они попали в немецкий концлагерь. В лагере Наташа познакомилась с сыном русских эмигрантов. Они полюбили друг друга и, не имея возможности вернуться в СССР, остались за границей. В конце 1960-х гг., после смерти дочери, Елена Михайловна вернулась в Советский Союз и жила вместе со своим братом в Калининграде. Умерла она в начале 1980-х гг.

## РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА «ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ» ПРИГЛАШАЕТ К СОТРУДНИЧЕСТВУ

# ученых и специалистов, а также интернациональные коллективы ученых, занимающихся исследованием полярных областей Земли

«Проблемы Арктики и Антарктики» издаются с 1937 года. В издании публикуются статьи по широкому спектру научных проблем в области гидрометеорологии, океанографии, климатологии, геофизики, водных ресурсов и охраны окружающей среды в полярных областях Земли.

Журнал издается Государственным научным центром Российской Федерации — Арктическим и антарктическим институтом Росгидромета и включен в перечень ведущих российских рецензируемых научных журналов и изданий. В состав редколлегии входят ведущие специалисты научных организаций России и зарубежных стран.

Журнал выходит ежеквартально.

Публикация осуществляется бесплатно.

Публикации (на русском или английском языках) принимаются по электронной почте секретарями редколлегии журнала: aam@aari.ru, buzin@aari.ru.

При подаче статьи необходимо соблюдать требования к оформлению статей, которые публикуются ниже.

## EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL ARCTIC AND ANTARCTIC-RELATED ISSUES («ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ») IS HIGHLY INTERESTED IN COOPERATING WITH

## Scientists, specialists and international scientific groups studying Polar Regions of Earth

The journal Arctic and Antarctic-related issues has been published since 1937. It covers a wide range of scientific problems in the fields of hydrometeorology, oceanology, climatology, geophysics, water resources and environmental protection in Polar Regions of Earth.

The journal is published by State Scientific Center of the Russian Federation, Arctic and Antarctic Research Institute of Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring of Russia, and is highly ranked among the leading peerreviewed periodicals. Editorial board consists of leading specialists from scientific institutions both in Russia and abroad.

Arctic and Antarctic-related issues is a quarterly journal.

Publication of manuscripts is free of charge.

Materials (in Russian or in Egnlish) should be submitted via e-mail to the secretaries of the journal's editorial board: Alexander Merkulov (aam@aari.ru) and Igor Buzin (buzin@aari.ru).

When submitting your manuscript please consult the following formatting guide.

# FORMATTING GUIDE FOR MANUSCRIPTS SUBMITTED TO THE JOURNAL ARCTIC AND ANTARCTIC-RELATED ISSUES

- 1. Article should fill no more than 15 pages of Microsoft Word document, formatted with 18-point interline spacing, including references, tables and figures.
- 2. Files are submitted to the editorial board secretaries via e-mail.
- 3. Submitted materials should include:
- text of the article in English (with figures, figure legends, tables and references);
- all illustrations as individual files in any graphic format allowed by requirements below;
- an abstract;
- keywords;
- information on authors (scientific degree, occupation, the title of organization and its address, e-mail and telephone number (the latter will not be published in the article));

a covering letter signed by the head of institution where authors work, or by authors themselves.
 *Text files*

Our preferred word processor is Microsoft. When formatting your text please use standard 12-point Times New Roman. For Greek letters and other special characters use Symbol font.

5. Tables

Tables should be typed in Microsoft Word with 9-point Times New Roman (Symbol, if necessary). Each table cell should contain no more than one paragraph. One should bear in mind that the maximum width of a table at the portrait orientation of the page is 125 mm, whereas at the landscape one -195 mm.

Table cells are divided from each other by 0.5-point lines.

6. Graphic files

Author may prepare images in any available graphic editor or application. Each image should be presented in an individual file of one of the following graphic formats: \*.jpg, \*.tif, \*.eps, \*.cdr, \*.wmf, \*.ai, \*.xls. All figures should be in the same style (i.e. fonts, lines, etc.).

We recommend that you use black and white illustrations. Colour illustrations are allowed only in exceptional cases after the approval of the editorial board. Longest side of a raster illustration should be not less than 900 pixels.

For vector illustrations (Corel Draw, Adobe Illustrator, Microsoft Excel figures or files, converted into \*.wmf) please use only standard Windows fonts (Arial, Times New Roman, Symbol).

Axes should be labeled only with one of the above mentioned fonts, regular face and size of 8-10 points.

7. Formulae

MathType/Word Equation Editor should be used for formulae typing in Microsoft Word 2010 (2013) or earlier versions like Microsoft Word 2007, respectively. Formulae font size should be 10 points.

8. References

Works cited in the article are arranged alphabetically by the surname of the first author (in case the author, for some reason, is unknown – by the first letter of the work's title).

In the text of the article itself the reference should be given as follows: if there are two authors at maximum, they are listed by surname without initials, followed by comma and then – year of publication, all in parentheses. If there are three or more authors, the reference goes in the format: (First author's surname et al., year of publication).

The editorial board retains the right to make all necessary editing corrections, add-ons and cuts.

# ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРЕДСТАВЛЯМЫМ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ»

- 1. Объем статьи не должен превышать 15 страниц текста в формате Microsoft Word с полуторным интервалом, включая список литературы, таблицы и рисунки.
- Статьи должны быть представлены в распечатанном виде и переданы в электронном формате на CD или flash-накопителе (только при личной явке автора) в соответствии с нижеприведенными требованиями. Допускается пересылка файлов со статьей по электронной почте.
- В комплект статьи, присылаемой автором, должны входить:

   основной текст статьи на русском языке (включает в себя подрисуночные подписи и библиографический список);

 иллюстративный материал в виде отдельных файлов любого из графических форматов в соответствии с нижеприведенными требованиями;

- текст аннотации на русском и английском языках;
- ключевые слова на русском и английском языках;
- название статьи, инициалы и фамилии авторов на русском и английском языках;

 сведения об авторах (ученая степень, должность, название организации и ее полный почтовый адрес, электронная почта и телефон (в статье не публикуется)) только на русском языке;
 УДК статьи;

акт экспертизы и сопроводительное письмо, подписанное руководителем организациии или учреждения, где работает автор (авторы), или самим автором (авторами).

4. Требования к представляемым текстовым файлам.

Текст должен быть представлен в формате Word. При подготовке текста необходимо использовать стандартный шрифт Times New Roman 12 пт., для набора греческих и некоторых специальных символов использовать шрифт Symbol.

Дробные части чисел отделяются от целых ЗАПЯТОЙ, а не точкой.

Не допускается:

- использование цифры 0 и буквы О в надстрочном написание в качестве символа градуса;

- символа «-» (дефис) вместо «-» (тире);

- использование символа «х» вместо символа «×»;

-использование символов N, O, S, W в качестве указания широты и долготы как в текстах, так и на картах;

В качестве внешних кавычек используется пара «». При необходимости использования внутренних кавычек набираются кавычки "".

5. Требования к таблицам.

Таблицы должны быть подготовлены в Microsoft Word шрифтом Times New Roman (при необходимости Symbol) 9 пт.

В каждой ячейке таблицы НЕ ДОЛЖНО БЫТЬ более одного абзаца.

При подготовке таблиц следует помнить, что максимальная ширина таблицы в книжной ориентации — 125 мм, в альбомной — 195 мм.

Таблицы оформляются разделительными линиями толщиной 0,5 пт.

6. Требования к графическим файлам.

Иллюстрации к статье готовятся в любом доступном для автора редакторе или приложении. При этом каждая иллюстрация ПРЕДСТАВЛЯЕТСЯ В ВИДЕ ОТДЕЛЬНОГО ФАЙЛА в одном из графических форматов: \*.jpg, \*.tif, \*.eps, \*.cdr, \*.wmf, \*.ai. Допускается иллюстративный материал в формате \*.xls (строго БЕЗ рамок). Все иллюстрации должны быть ЕДИНООБРАЗНЫ (шрифт, линии) по стилю.

В публикации рекомендуется использовать черно-белые иллюстрации. Использование цветных иллюстраций допускается в исключительных случаях и только по согласованию с редакцией. Растровые изображения должны иметь размер не менее 900 пикселей по короткой стороне.

Размер и ориентация иллюстрации подбираются автором в соответствии с размером полосы верстки, которая составляет 195×125 мм (максимальный размер иллюстрации, включая подрисуночную подпись и легенду). Для иллюстраций в векторном формате (рисунк в формате Corel Draw, Adobe Illustrator, Microsoft Excel или файлы, экспортированные в формат \*.wmf) необходимо использовать только стандартные шрифты Windows (Times New Roman, Symbol) или их аналоги Туре-1. При использовании иных шрифтов они должны быть проконвертированы в кривые.

Для оцифровки осей рисунков необходимо использовать только вышеуказанные шрифты НОРМАЛЬНОГО начертания, размером не более 10 пт. Десятичный знак при оцифровке осей и аппликаций — только ЗАПЯТАЯ.

Все карты, схемы, диаграммы, рисунки должны быть на русском языке.

7. Требования к формулам.

Для набора формул в версиях Microsoft Word 2010 (2013) следует использовать формульный редактор MathType; для версий Microsoft Word 2007 и более ранних, кроме MathType, можно использовать встроенный в Microsoft Word редактор Equation Editor. Размер шрифта основного текста – 10.

8. Требования к списку литературы.

Список работ, на которые есть ссылки в тексте, формируется в алфавитном порядке по фамилии первого автора (при отсутствии автора используется первая буква названия работы). Сначала идет перечень публикаций на русском языке, далее — зарубежных публикаций также в алфавитном порядке. Все работы из списка оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылка на работу дается в тексте следующим образом. Если число авторов не превышает двух, то в круглых скобках приводится фамилия автора (авторов) без инициалов и через запятую год издания. Если число авторов три и более, то ссылка давется в форме (Фамилия первого автора и др., год издания).

С полным перечнем требований к статьям можно ознакомиться на web-странице журнала *http://www.aari.ru/main.php*.

Редакция оставляет за собой право делать необходимые редакционные исправления, дополнения, сокращения.

> За размещение статей в журнале плата НЕ ВЗИМАЕТСЯ. Всем авторам публикаций бесплатно высылается один экземпляр журнала.

## Сборник научных статей ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ № 3 (105)

Подписано в печать 11.09.2015 Формат 70×100 1/16 Тираж 200 Печать офсетная Печ. л. 7,5 Заказ № 0354938

Типография ООО «Супервэйв Групп»

188681, Ленинградская область, Всеволожский район, пос. Красная Заря, д. 15

К статье Е.А. Спиридонова, О.Н. Виноградовой



Рис. 2. Фазовые диаграммы разностей векторов: прогноз океанического эффекта минус наблюдения для 8 волн и 14 океанических моделей. Антарктическая станция Syowa.



К статье А.Е. Вязиловой, Г.В. Алексеева, А.А. Балакина, А.В. Смирнова

Рис. 6. Эволюция аномалий солености на разрезах: в северной части залива Баффина (левая колонка), западной части пролива Фрама (правая колонка) в1951–1960 гг. (*a*),1961–1970 гг. (*б*), 1971–1980 гг. (*в*), 1981–1990 гг. (*г*), 1991–2000 гг. (*д*), 2001–2012 гг. (*е*).





Рис. 7. Климатические поля аномалий солености по декадам: 1951–1960 гг. 20 м (*a*), 1961–1970 гг. 20 м (*б*), 1971–1980 гг. 50 м (*b*), 1981–1990 гг. 50 м (*c*), 1991–2000 гг. 50 м (*d*), 2001–2013 гг. 50 м (*e*).

К статье И.А. Немировской, А.В. Травкиной, И.П. Трубкина



Рис. 5. Состав н-алканов донных осадков различных районов дельты Северной Двины во время половодья: *1* — ст. 19, район слива вод ЦБК; *2* — ст. 45, Двинский залив; *3* — ст. 53, протока Маймакса; *4* — ст. 55, Чижовский рейд.



К статье Н.В. Кубышкина, Ю.П. Гудошникова

Рис. 2. Разгрузка на припай т/х «Иван Папанин», о. Котельный, 2014 г.