

УДК 551.46

П.А. ФАЙМАН, В.И. ПОНОМАРЁВ

Диагностические расчеты циркуляции вод залива Петра Великого по данным экспедиций ДВНИГМИ 2007–2010 гг.

Для расчета циркуляции вод в зал. Петра Великого (Японское море) использована диагностическая модель, которая представляет собой линеаризованную версию модели Саркисяна D3. Входными данными явились результаты CTD измерений, проведенных Дальневосточным региональным научно-исследовательским гидрометеорологическим институтом (Владивосток) на акватории зал. Петра Великого с 2007 по 2010 г. Выявлены основные черты циркуляции морской воды, характерные для времени проведения данных океанографических съемок.

Ключевые слова: циркуляция морских вод, течения, зал. Петра Великого, диагностические модели.

Diagnostic simulation of sea currents in the Peter the Great Bay based on FERHRI oceanographic surveys from 2007 to 2010. P.A. FAYMAN, V.I. PONOMAREV (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

Sarkisyan's D3 modified linear diagnostic model is applied to simulate current system in the Peter the Great Bay (the Sea of Japan) using oceanographic CTD observations carried out by Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute (FERHRI) from 2007 to 2010. The main features of sea water circulation, which are typical for the periods of the oceanographic surveys, were revealed.

Key words: sea water circulation, currents, Peter the Great Bay, diagnostic models.

Введение

Несмотря на большое количество океанографических наблюдений, проведенных в различных районах зал. Петра Великого (ЗПВ), включая временные ряды измерений течений, в настоящее время нет полной информации о циркуляции вод на всей акватории залива, специфичной для определенных сезонов и метеорологических ситуаций. Поэтому знания о морских течениях в ЗПВ и их изменчивости, полученные на основе наблюдений и гидродинамических моделей, имеют большое научное и практическое значение.

При помощи инструментальных измерений, выполненных поплавокками Митчелла, К.А. Гомоюнов построил схему характерных летних течений в Амурском заливе

*ФАЙМАН Павел Аркадьевич – ведущий инженер, ПОНОМАРЁВ Владимир Иванович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток). *E-mail: pavel.fayman@gmail.com

Работа над выводом уравнений диагностической модели и ее численной реализацией (раздел «Модель и данные» настоящей статьи) выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-05-00213). Численные эксперименты с использованием результатов экспедиций ДВНИГМИ (раздел «Результаты диагностических расчетов» настоящей статьи и все его подразделы) проводились при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-17-10025).

в поверхностном и в придонном слоях воды [3]. Согласно этой схеме летом циркуляция циклоническая в северной части Амурского залива и антициклоническая в южной. Максимальные скорости достигают 40 см/с. Изменение системы течений в суточном масштабе времени в значительной степени зависит от ветра и приливов. Н.А. Белинский и Ю.В. Истошин [1, 6] изучали течения на шельфе Приморья, в частности береговое Приморское течение и его ветвь в восточной части ЗПВ, с использованием бутылочной почты, инструментальных измерений и динамического метода. Сложная структура течений, ее изменение с глубиной и зависимость от ветра в прол. Старка исследованы А.В. Новожиловым и соавторами [9] при обработке инструментальных измерений. Схема В.В. Яроша на основе статистического анализа инструментальных измерений, опубликованная в диссертации О.В. Зайцева [4], показывает антициклоническую циркуляцию в северной части Амурского залива. Н.И. Савельева в [10] публикует результаты моделирования течений Амурского и Уссурийского заливов при помощи баротропной модели, базирующейся на уравнениях мелкой воды [2]. Выявлены зависимость циркуляции в заливах от направления преобладающего ветра и ее сезонная изменчивость. Эта же модель была использована для расчета течений в эстуарной зоне р. Туманная в работе [8], где также представлены результаты инструментальных измерений при южном и северном ветрах. Э.А. Иващенко предложил схему дрейфовых течений в Амурском и Уссурийском заливах для различных типовых ветров [5]. Течения рассчитывались по методу, разработанному в Государственном океанографическом институте. В этой же статье приведена обобщенная схема течений всей акватории ЗПВ. Схема циркуляции вод Уссурийского залива, построенная на основе упрощенной диагностической модели, представлена в книге В.Н. Сойфера [12].

В начале 2000-х годов в Дальневосточном региональном научно-исследовательском гидрометеорологическом институте (ДВНИГМИ, Владивосток) была разработана программа океанографических съемок в ЗПВ для различных сезонов года. Течения вод зал. Петра Великого, рассчитанные при помощи линейной диагностической модели на основе данных экспедиций 2001 и 2003 гг., были опубликованы в [13, 14].

В настоящей работе представлены результаты расчетов течений по данным экспедиций ДВНИГМИ, проведенных с 2007 по 2010 г.

Модель и данные

Для расчета течений нами использована линейная диагностическая модель, теоретические основы которой сформулированы в работе А.С. Саркисяна [11]. Исходная система формул включает упрощенные уравнения движения (исключены адвекция и горизонтальный турбулентный обмен) и неразрывности в приближениях гидростатики и Буссинеска. Граничные условия на поверхности моря – напряжение трения ветра и «жесткая крышка». После преобразования исходных формул полученная система дифференциальных уравнений в частных производных включает эллиптическое уравнение уровня моря, уравнение неразрывности и явные формулы для вычисления горизонтальных компонент векторов течений.

При численном решении эллиптического уравнения уровня моря применен метод, описанный в монографии В.П. Кочергина [7]. Его суть заключается в сведении задачи Неймана к задаче Дирихле, т.е. уровенная поверхность последовательными приближениями вычисляется в узлах замкнутой границы расчетной области, а затем во внутренних точках области.

При численной аппроксимации вторых производных по горизонтальным координатам использована схема центральных разностей, а при аппроксимации первых производных – схема направленных разностей. Последовательные приближения полученной системы линейных уравнений для значений уровня в узлах сетки выполнены с помощью метода

Гаусса–Зейделя. Для дискретизации уравнений горизонтальных компонент вектора скорости применялись центральные разности.

В дальнейшем полная система численных уравнений модели решалась итерационным методом до полного установления.

Отличие предлагаемой модели от модели линейной диагностической модели Саркисяна D1 – в более корректной численной схеме решения граничной задачи для уровня. Это позволяет методом последовательных приближений согласовать поле течений с рельефом и береговой чертой. Вторая особенность модели – исключение завышенного влияния резких градиентов рельефа дна [13].

Основными исходными данными являются материалы океанографических наблюдений, выполненных судами ДВНИГМИ в пяти экспедициях: 24–30.07.2007, 10–16.09.2008, 5–11.08.2009, 20–26.04.2010, 24–28.08.2010.

Измерения температуры и электропроводности морской воды проводились CTD зондами FSI с вертикальной дискретностью 1 м.

Параметры, предопределенные внешними полями в диагностической модели, представляют собой трехмерные поля плотности морской воды, рассчитанные по измеренным температуре и солёности, и двумерные поля компонентов напряжения трения ветра, рассчитанные по параметрам ветра [16]. Поля плотности интерполировались в узлах сети с разрешением 1,5'. Поле ветра над исследуемой акваторией должно быть однородным, что, как правило, подтверждается после прямых измерений направления и скорости ветра, проводимых одновременно с океанографическими съёмками. Плотность морской воды определялась по уравнению ее состояния [15]. Батиметрия была оцифрована с навигационной карты «Японское море, северо-западное побережье, подходы к заливам Восток и Находка», масштаб 1: 50 000.

Область моделирования (рис. 1) лежит в пределах 131,1–133,3° в.д., 42,35–43,35° с.ш. Дискретность расчетной сетки – 1/80° по широте и долготе. Интерполяция с исходной сетки на расчетную выполнялась методом линейного кригинга. По вертикали расчет велся через каждый метр.

Результаты диагностических расчетов

Для удобства анализа результатов экспедиций область исследований можно условно разделить на части:

центральную, лежащую в пределах 131,8–133,2° в.д. и 42,4–42,9° с.ш.; для нее характерна интенсивная антициклоническая завихренность;

восточную, 132,3–133,2° в.д., – от о-ва Аскольд до мыса Поворотный;

западную – район вокруг о-вов Римского-Корсакова;

заливы Амурский и Уссурийский.

Первая океанографическая экспедиция июля 2007 г.

Были получены следующие результаты (рис. 2).

В центре исследуемого района находится антициклон, вытянутый с севера на юг, со сложной структурой. Он состоит из трех антициклонов: северного, диаметром 15 км, в восточной части Уссурийского залива; центрального, диаметром 30 км, с центром западнее прол. Аскольд; южного, диаметром 50 км, с центром в точке с координатами 132,2° в.д., 42,6° с.ш. Скорости течения на восточной периферии антициклона лежат в пределах 25–40 см/с, на западной – до 15 см/с.

Восточнее этого вихря на траверзе бухты Анна находится пара вихрей – антициклонический на севере и циклонический на юге. На траверзе мыса Поворотный расположен антициклонический вихрь. Течения на его периферии достигают скорости 40 см/с.

В западной части исследуемой области расположен поток западного направления, образующий циклоническую завихренность в области 131,2–132° в.д., 42,4–42,9° с.ш., со скоростями в пределах 5–20 см/с.

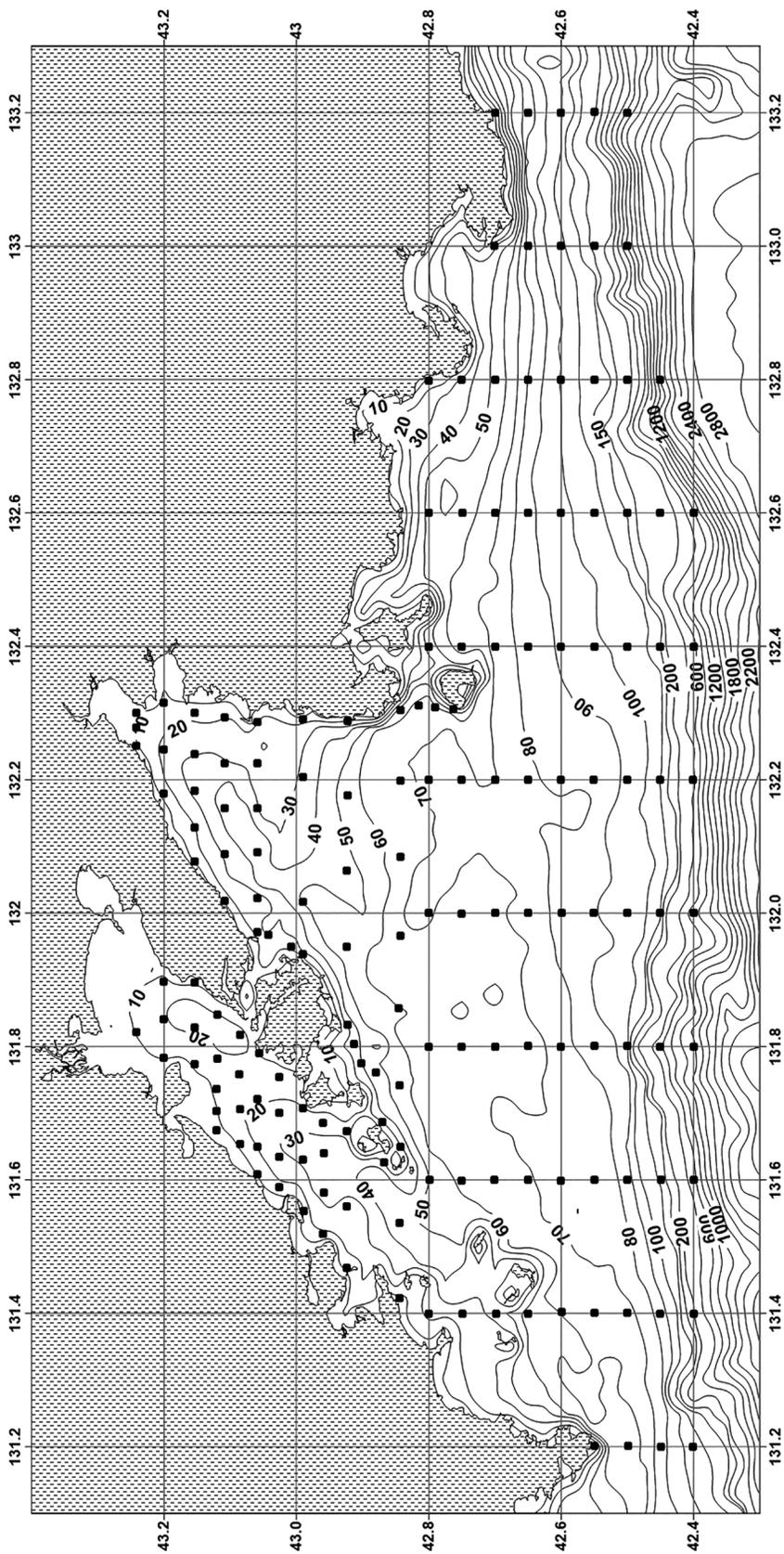


Рис. 1. Область исследований. Точками отмечены СТВ-станции

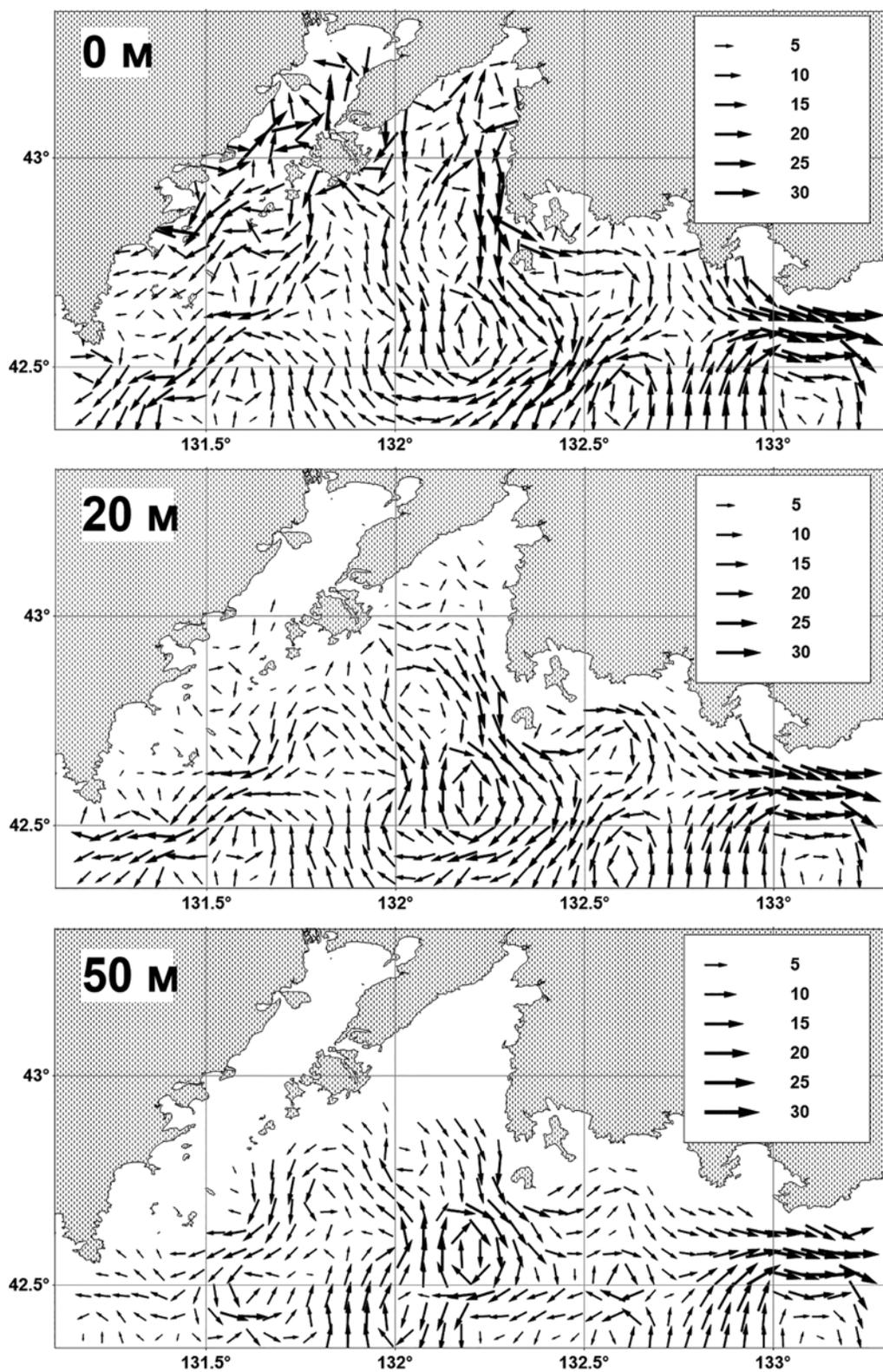


Рис. 2. Результаты диагностических расчетов течений в зал. Петра Великого на разных глубинах по данным экспедиции ДВНИГМИ, июль 2007 г. Рядом со стрелками здесь и на рис. 3–6 – скорость течений, см/с

В Амурском заливе видна цепочка антициклонических вихрей вдоль архипелага Императрицы Евгении. В северной части Амурского залива находится антициклонический вихрь, в центральной – поток северо-восточного направления. На северо-западе Уссурийского залива присутствует циклонический вихрь. В прибрежных районах заливов, где наблюдаются струйные течения, скорость движения воды может достигать 30 см/с.

Вторая океанографическая экспедиция сентября 2008 г.

Результаты расчетов показали наличие в центральной части района исследований антициклона в форме эллипса, главная ось которого имеет направление с северо-запада на юго-восток., с центром в точке с координатами 132,25° в.д., 42,55° с.ш. На его периферии скорости течений в среднем около 30 см/с (рис. 3), наиболее интенсивные, до 60 см/с, они юго-западнее о-ва Аскольд. Этот антициклон прослеживается до придонного слоя. На его периферии расположены циклонические вихри.

В восточной части исследуемой области наблюдается течение восточного и юго-восточного направлений, средняя скорость которого около 30 см/с и которое прослеживается в поверхностном, промежуточном и придонном слоях.

В западной – поток северо-восточного направления, подпитывающий антициклон.

В Уссурийском заливе в поверхностном слое – поток северного направления, в придонном – антициклонический вихрь. Восточнее и западнее прол. Босфор Восточный находятся циклонические вихри. Скорости течений в Амурском и Уссурийском заливах – 10–20 см/с.

Третья океанографическая экспедиция августа 2009 г.

Результаты расчетов показали, что в центре ЗПВ расположен антициклонический вихрь размером 70 км с центром в точке 132° в.д., 42,6° с.ш. с циклоническими вихрями на его периферии (рис. 4). Скорости течения на периферии этого вихря в поверхностном слое в пределах 30–50 см/с.

В восточной части исследуемой области наблюдается поток юго-западного направления со скоростями 25–30 см/с. Между этим потоком и берегом лежит цепочка антициклонических вихрей. Данные элементы циркуляции прослеживаются от поверхности до дна.

Циркуляция в западной части исследуемой области имеет циклонический характер, с интенсивным юго-западным потоком вдоль западного побережья зал. Петра Великого.

В Уссурийском заливе в придонном горизонте обнаруживается антициклон, в поверхностном слое – сложная циркуляция из нескольких циклонических и антициклонических вихрей. В Амурском заливе наблюдается общий юго-западный перенос с интенсификацией вдоль берегов. В северной части Амурского залива – антициклон. Структура течения в центральной части Амурского залива свидетельствует о переносе вод через прол. Босфор Восточный из Уссурийского в Амурский залив. Скорости течений в Амурском и Уссурийском заливах в пределах 20–30 см/с.

Четвертая океанографическая экспедиция апреля 2010 г.

В апреле 2010 г. течения были слабее, чем в летний и осенний периоды (рис. 5). В западной и центральной части ЗПВ течения имеют преимущественно северное, северо-восточное направление со слабыми скоростями до 10 см/с. Эта тенденция прослеживается на всех горизонтах от поверхностного до придонного. В восточной части ЗПВ наблюдается поток западного направления. В Уссурийском заливе – антициклон с циклоническими вихрями на его периферии. Интенсивные (до 25 см/с), по сравнению с остальными районами, течения в Амурском заливе объясняются тем, что во время прохождения экспедиционного судна по Амурскому заливу ветер был сильнее, чем в остальные дни экспедиции. На севере и юге Амурского залива находятся антициклонические вихри, в его центре – циклонический.

Пятая океанографическая экспедиция августа 2010 г.

Результаты моделирования обнаруживают поток западного направления во всей открытой части ЗПВ со скоростями 20–30 см/с (рис. 6). Западнее о-ва Аскольд он распадается на два потока: первый со скоростями 15 см/с следует от прол. Аскольд до архипелага

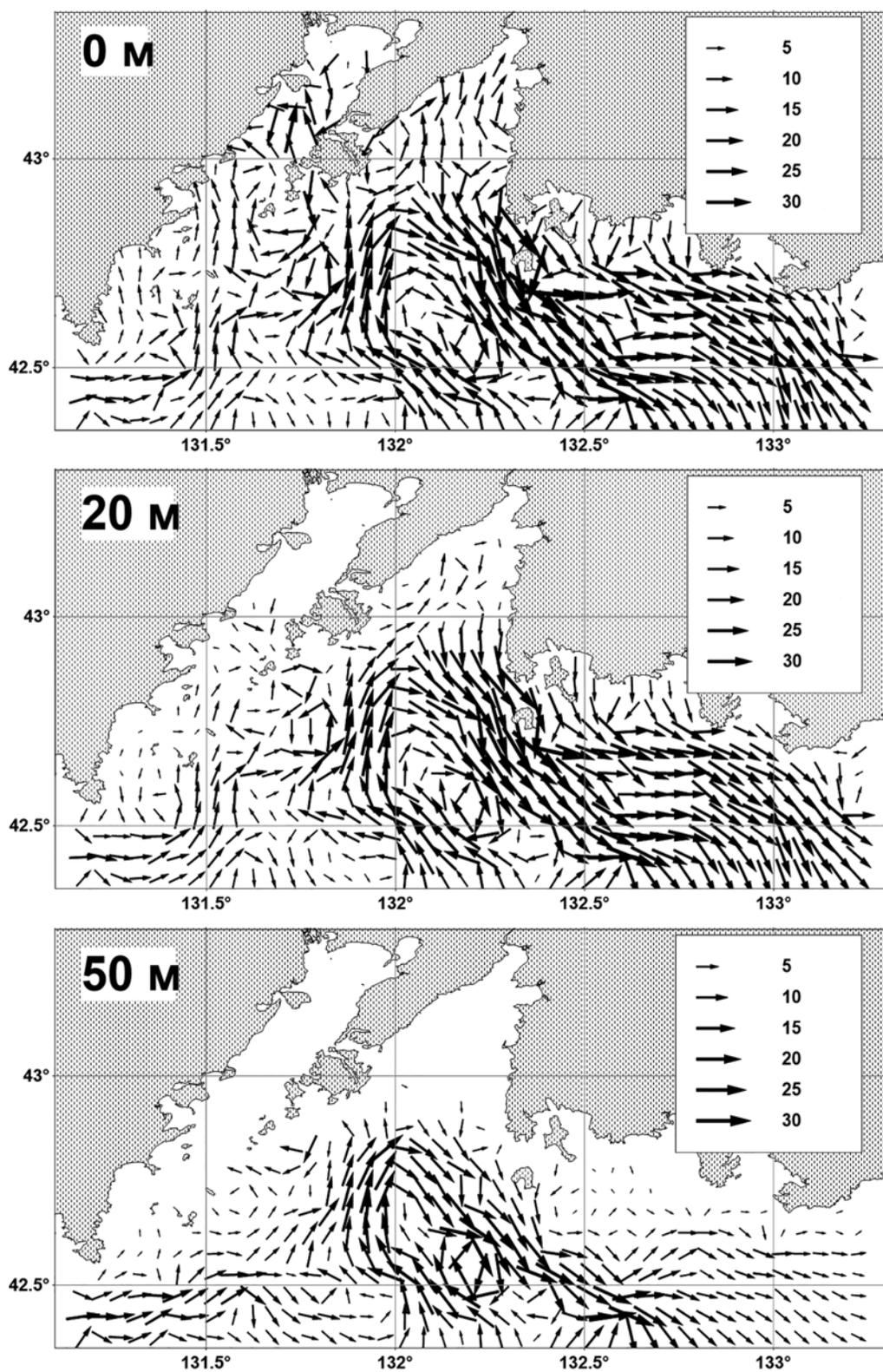


Рис. 3. Результаты диагностических расчетов течений в зал. Петра Великого на разных глубинах по данным экспедиции ДВНИГМИ, сентябрь 2008 г.

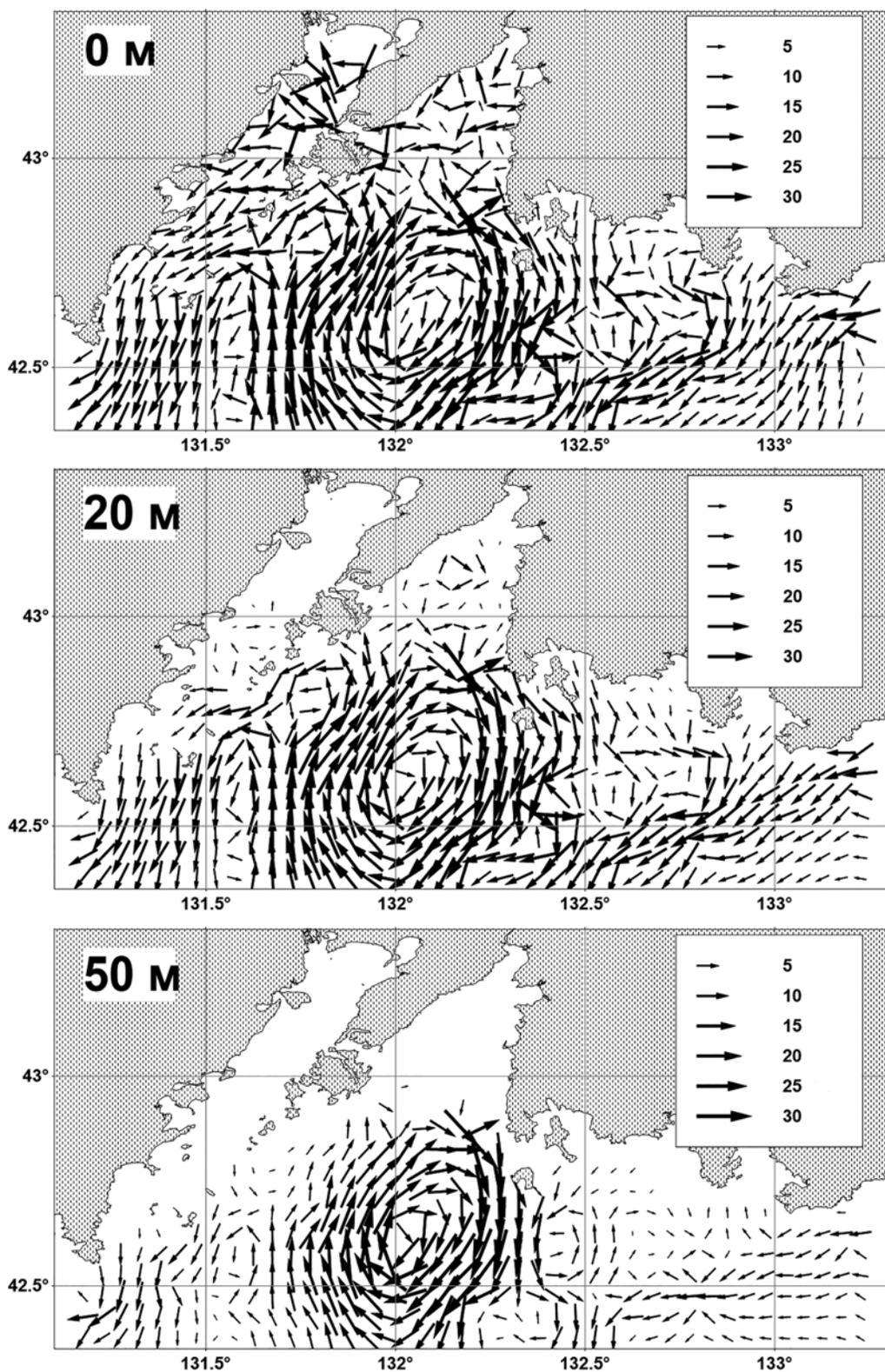


Рис. 4. Результаты диагностических расчетов течений в зал. Петра Великого на разных глубинах по данным экспедиции ДВНИГМИ, август 2009 г.

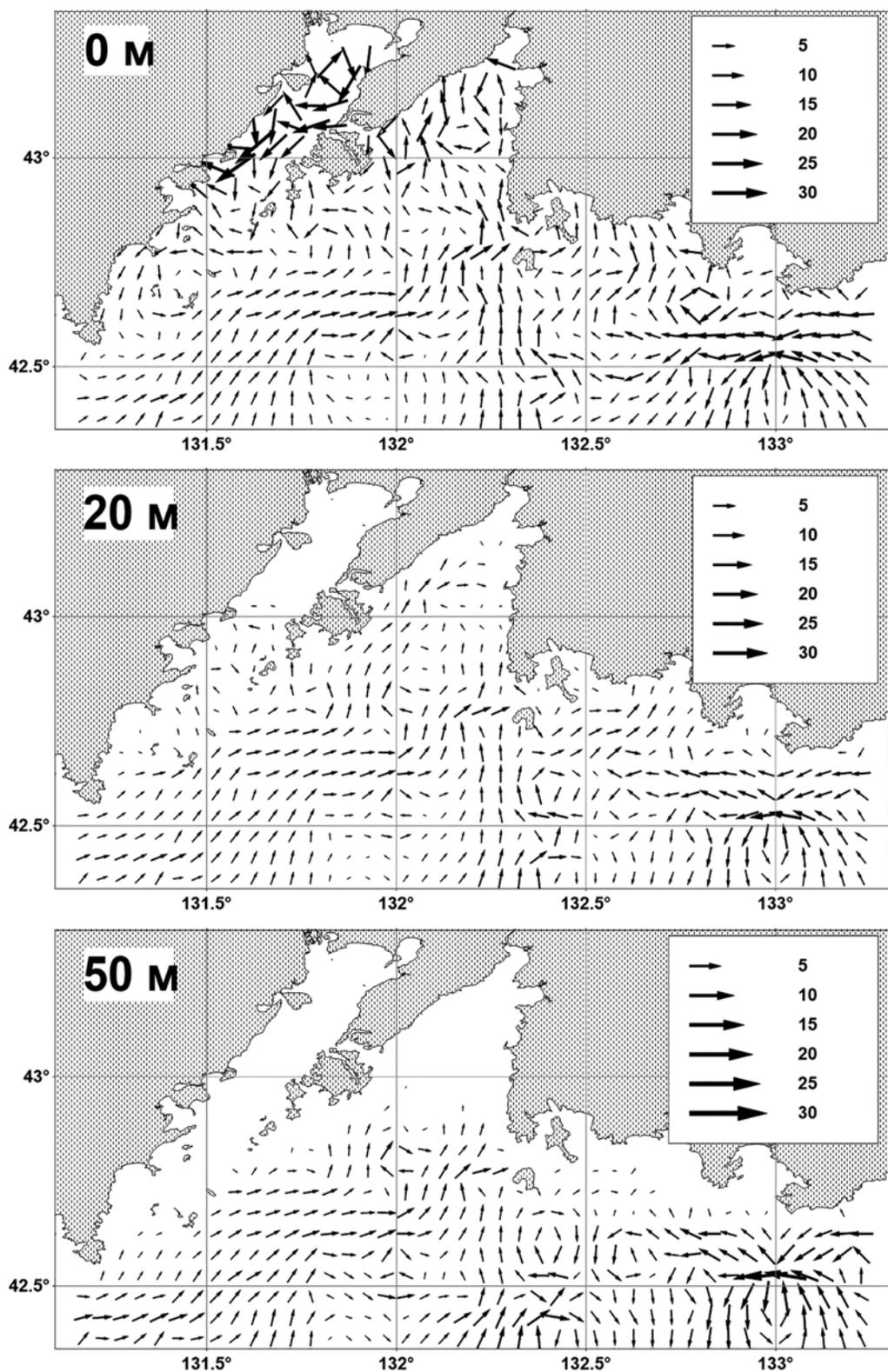


Рис. 5. Результаты диагностических расчетов течений в зал. Петра Великого на разных глубинах по данным экспедиции ДВНИГМИ, апрель 2010 г.

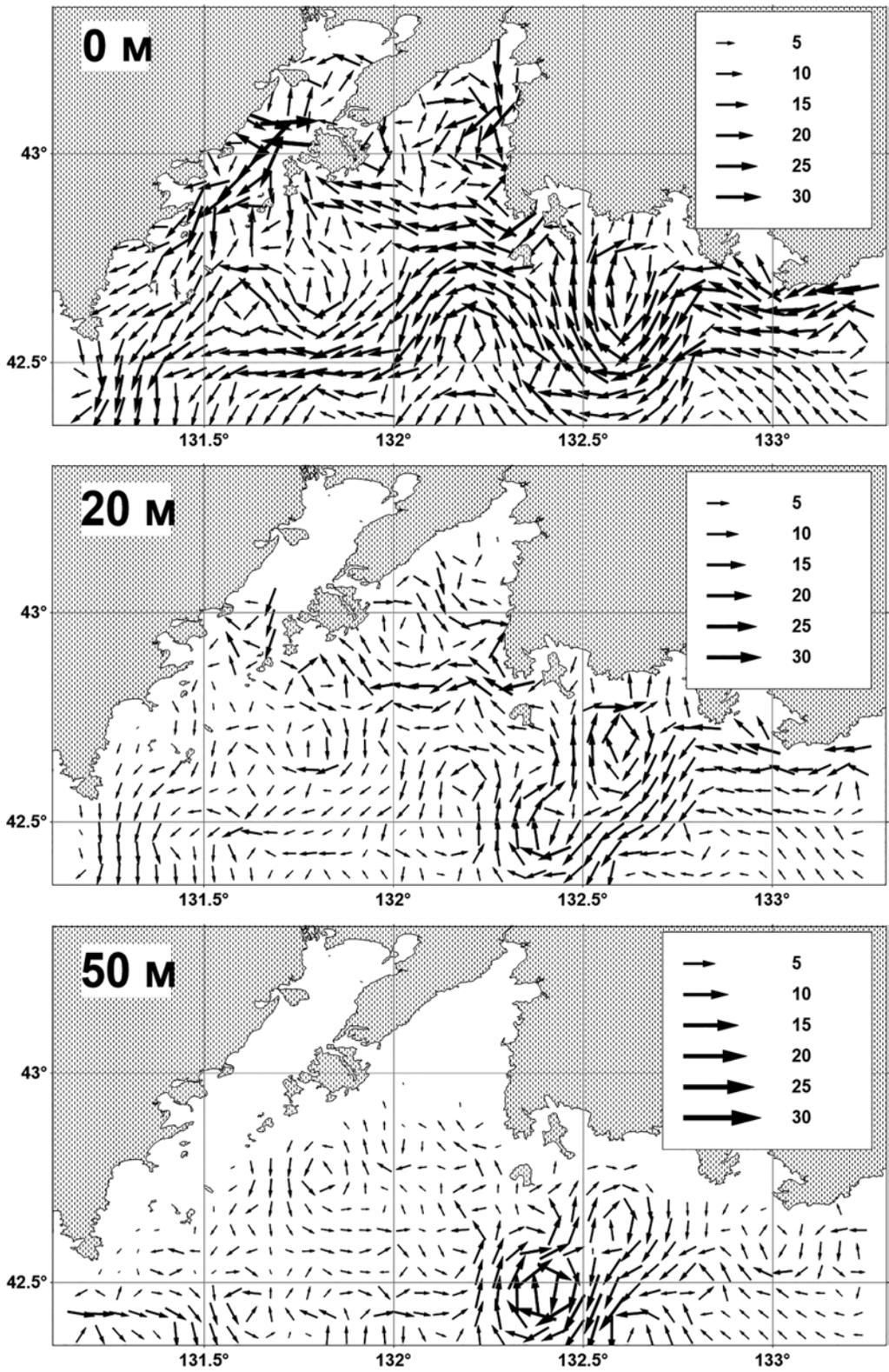


Рис. 6. Результаты диагностических расчетов течений в зал. Петра Великого на разных глубинах по данным экспедиции ДВНИГМИ, август 2010 г.

Императрицы Евгении, второй – вдоль южной границы ЗПВ. Южнее этого потока в центральной части южной границы находится циклон, на северной периферии – пара разнонаправленных вихрей. В этом потоке выделяется антициклонический вихрь радиусом 50 км, центр которого находится в точке с координатами 132,6° в.д., 42,7° с.ш. Этот вихрь в придонном слое распадается на пару антициклонов.

В Уссурийском заливе отмечена антициклоническая циркуляция с явно выраженным потоком вдоль восточного побережья со скоростями до 25 см/с. В Амурском заливе – циклоническая циркуляция на севере, антициклоническая в центральной части и юго-западный поток в остальной части залива. Интенсификация течений до 40 см/с наблюдается в центре Амурского залива на периферии двух антициклонических вихрей.

Выводы

Результаты океанографических экспедиций, которые ДВНИГМИ проводил в период с 2001 по 2010 г., показали, что циркуляция вод в зал. Петра Великого имеет сильную синоптическую изменчивость, это уменьшает возможность оценки ее сезонной изменчивости. Наиболее типичным является антициклон в центральной части зал. Петра Великого. Его хорошо видно на съемках 2001 (август, ноябрь), 2007, 2008 и 2009 гг. Для восточной части залива характерен западный перенос вод, сопровождаемый чаще антициклоническими вихрями на его северной периферии. Циркуляция вод Уссурийского и Амурского заливов в большой степени зависит от ветра. В поверхностном горизонте Уссурийского залива преобладает дрейфовая компонента скорости течения, в придонном – антициклоническая завихренность. В Амурском заливе при сильном ветре доминирует дрейфовая компонента, при слабом ветре наблюдается сложная вихревая динамика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белинский Н.А., Истошин Ю.В. Приморское течение по материалам экспедиции шхуны «Россинанте» 1936 г. // Тр. Центрального института прогнозов. 1950. Т. 17. С. 132–143.
2. Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В. Теория мелкой воды. Океанологические задачи и численные методы. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 207 с.
3. Гомоюнов К.А. Гидрологический очерк Амурского залива и реки Суйфуна // Тр. ГДУ. 1926. Т. 3, № 1. С. 1–22.
4. Зайцев О.В. Статистическое моделирование переноса примеси в прибрежной зоне моря: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Владивосток, 1985. 124 с.
5. Иващенко Э.А. Циркуляция вод залива Петра Великого // Географические исследования шельфа дальневосточных морей. Владивосток: ДВГУ, 1993. С. 31–61.
6. Истошин Ю.В. Течения Японского моря по данным бутылочной почты // Тр. Центрального института прогнозов. 1950. Т. 17. С. 88–105.
7. Кочергин В.П. Теория и методы расчета океанических течений. М.: Наука, 1978. 128 с.
8. Мощенко А.В., Ванин Н.С., Ламыкина А.Е. Рельеф дна, донные отложения и гидрологические условия российской части приустьевой зоны реки Туманная // Экологическое состояние и биота залива Петра Великого и реки Туманная. Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 42–75.
9. Новожилов А.В., Титлянова Т.В., Павликов А.Г. Характеристики поля анфельции и их связь с динамикой вод в проливе Старка (Японское море) // Биология моря. 1981. № 4. С. 19–26.
10. Савельева Н.И. Общая схема циркуляции вод амурского и уссурийского заливов по результатам численного моделирования. Владивосток: ТОИ ДВО АН СССР, 1989. 28 с. Деп. ВИНТИ № 2268-В89.
11. Саркисян А.С. Численный анализ и прогноз морских течений. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 188 с.
12. Соيفер В.Н. Радиоэкология северного шельфа Японского моря. Владивосток: Дальнаука, 2002. 253 с.
13. Файман П.А. Расчет диагностических течений в заливе Петра Великого // Гидрометеорология и экология Дальнего Востока: тематич. вып. ДВНИГМИ № 4. 2003. Т. 4. С. 26–33.
14. Fayman P.A., Ponomarev V.I. Diagnostic simulation of sea currents in the Peter the Great Bay based on FERHRI oceanographic surveys // Pacific Oceanography. 2008. Vol. 4, N 12. P. 56–64.
15. UNESCO technical papers in marine science. UNESCO, 1981. N 36.
16. Yelland M., Taylor P.K. Wind Stress Measurements from the Open Ocean // J. Phys. Oceanogr. 1996. Vol. 26, N 4. P. 541–558.