

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/258121291>

Role of barotropic sealevel changes in current formation on the eastern shelf of the Laptev Sea

Article in *Doklady Earth Sciences* · February 2001

CITATIONS

22

READS

14

5 authors, including:



[Igor Dmitrenko](#)

University of Manitoba

103 PUBLICATIONS 1,553 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[J. Hoelemann](#)

Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre fo...

91 PUBLICATIONS 919 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Sergey A. Kirillov](#)

Centre for Earth Observation Science

72 PUBLICATIONS 907 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

All content following this page was uploaded by [Igor Dmitrenko](#) on 02 November 2016.

The user has requested enhancement of the downloaded file. All in-text references [underlined in blue](#) are added to the original document and are linked to publications on ResearchGate, letting you access and read them immediately.

УДК (551.461.22+551.465.41)(268.53)

РОЛЬ БАРОТРОПНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯ МОРЯ В ФОРМИРОВАНИИ РЕЖИМА ТЕЧЕНИЙ НА ШЕЛЬФЕ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

© 2001 г. И. А. Дмитренко, Й. А. Хьюлеманн, С. А. Кириллов,
С. Л. Березовская, Х. Кассенс

Представлено академиком А.П. Лисицыным 23.10.2000 г.

Поступило 24.10.2000 г.

Первые измерения течений в море Лаптевых датируются 1912 г. [1]. Однако целостные публикации, описывающие динамику вод этого моря на основе результатов натурных наблюдений, в настоящее время отсутствуют. Основной причиной этого была и остается дискретность измерений. Описания, сделанные в ряде обобщающих работ [2, 3], основаны в большей степени на общегеографических представлениях, нежели на материалах систематических и репрезентативных наблюдений. По диагностическим гидродинамическим расчетам [4] характер циркуляции в море Лаптевых определяется главным образом поверхностным распределением солёности, представленным на рис. 1. Оно формирует бароклинные деформации уровня моря, которые, якобы, значительно превышают вызываемые воздействием ветра модельные баротропные вариации. В действительности же, сгонно-нагонные колебания уровня моря в восточной части моря Лаптевых достигают 200–220 см [5]. Поэтому баротропные течения, связанные с ветровыми деформациями уровня моря, могут играть более важную роль в формировании режима течений, чем это представлено в [4]. Это подтверждают и результаты моделирования крупномасштабной ветровой циркуляции вод и льдов в Северном Ледовитом океане на основе двухмерной баротропной гидродинамической модели [6] и более ранние работы по моделированию сгонно-нагонных колебаний уровня с учетом ледяного покрова [7].

До настоящего времени одновременные длительные прямые измерения течений и уровня моря в российской Арктике отсутствовали. В 1998–1999 гг. в рамках Российско-германского проекта “Система моря Лаптевых-2000”, впервые в истории исследований российской Арктики на год на шельфе моря Лаптевых были установлены две донные океанографические станции, оснащён-

ные доплеровскими профилографами течений и донными STD-измерителями. Анализ уникальных годовых серий наблюдений за течениями, уровнем моря и придонной температурой воды на этих станциях позволил получить совершенно новое представление о характере и природе циркуляции вод в восточной части моря Лаптевых. Обсуждению этих результатов посвящена настоящая работа.

Донные океанографические станции, установленные на шельфе моря Лаптевых в августе 1998 г., были оборудованы акустическим доплеровским профилографом течений (ADCP) и STD-измерителем. Северная станция YANA находилась в районе среднегололетнего положения кромки припайного льда на склоне восточной подводной реликтовой долины р. Лены на глубине 44 м (рис. 1б). Южная станция LENA располагалась к востоку от дельты р. Лены на глубине 22 м. Измерения течений проводились каждую минуту. В память прибора записывались осредненные за 30 мин. две горизонтальные и вертикальная проекции вектора течений и интенсивность ослабления отраженного доплеровского сигнала. Дискретность наблюдений ADCP по вертикали составляла 2 м для станции YANA и 1.5 м для станции LENA. Донный STD-измеритель каждый час определял температуру, электропроводность воды и давление. Продолжительность записей течений и донных STD-характеристик составила 382 суток на станции LENA и 393 суток на станции YANA. При интерпретации результатов привлекались данные STD-наблюдений в российско-германских морских экспедициях на н.и.л. “Полярштерн” (июль–август 1998 г.) и г/с “Яков Смирницкий” (август–сентябрь 1999 г.).

ADCP-измерения возможно применить для дистанционного распознавания состояния поверхности моря [8], что было использовано при анализе полученных данных. Для этого также привлекались ежемесячные радиолокационные спутниковые изображения моря Лаптевых RADARSAT ScanSAR и

@@@

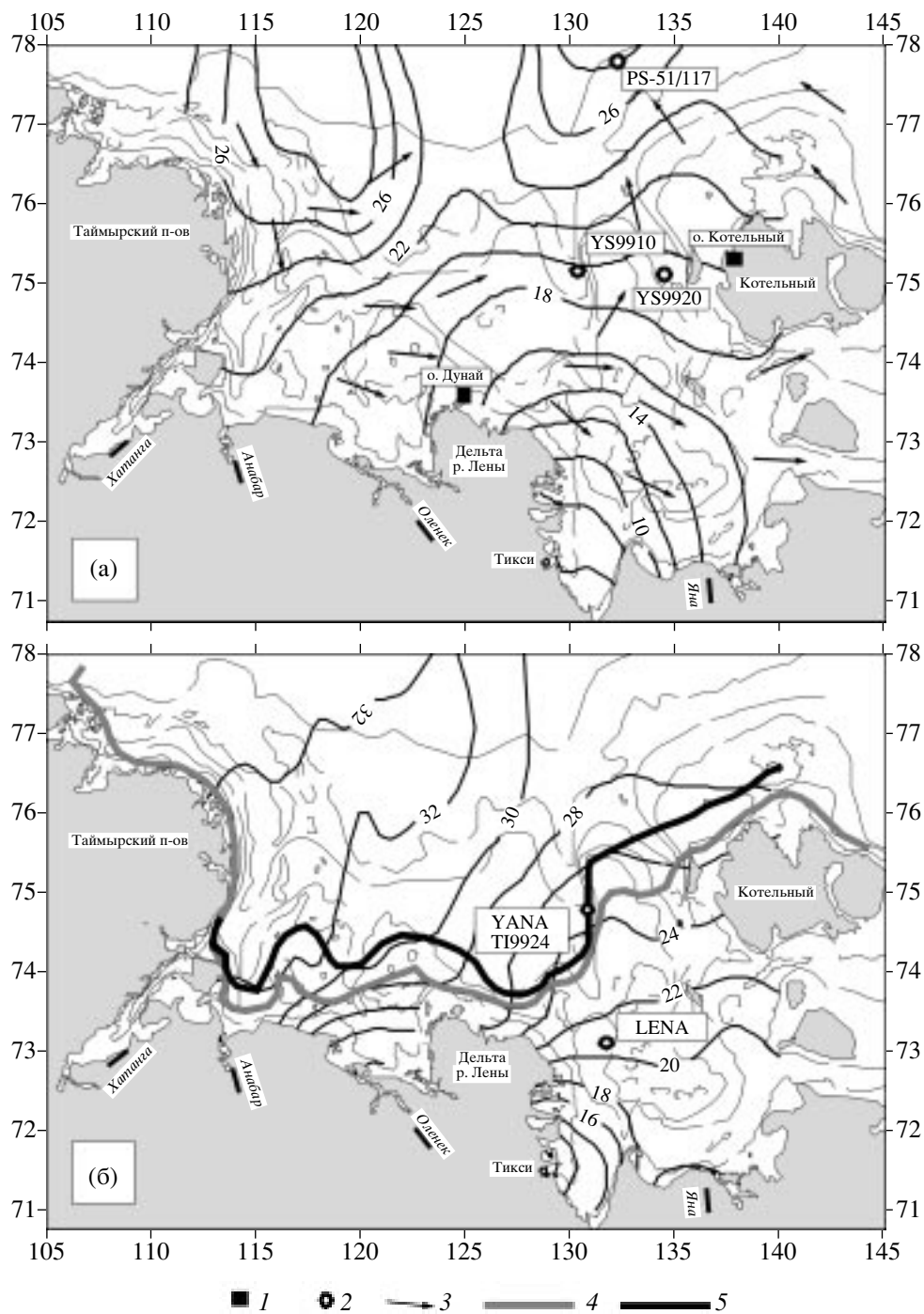


Рис. 1. Среднелетнее (а) и среднезимнее (б) распределение солености (‰) на поверхности моря Лаптевых и расположение океанографических станций. 1 – полярные станции; 2 – океанографические станции; 3 – направления поверхностных течений из [3]; 4 – среднемноголетнее положение кромки припайного льда на середину февраля; 5 – фактическое положение кромки припайного льда на середину февраля 1999 г.

ежесуточная метеорологическая информация с полярных станций о. Дунай и о. Котельный (рис. 1а). Чтобы исключить периодическую составляющую течений, исходные данные подверглись высокочастотной числовой фильтрации, суточному и декадному осреднению.

Анализ профильтрованных и осредненных данных годовой серий наблюдений за течениями на станции YANA показал, что динамика вод в этом районе моря главным образом обусловлена эпизодически возникающими южными течениями. В слое ниже пикноклина до 91% дисперсии те-

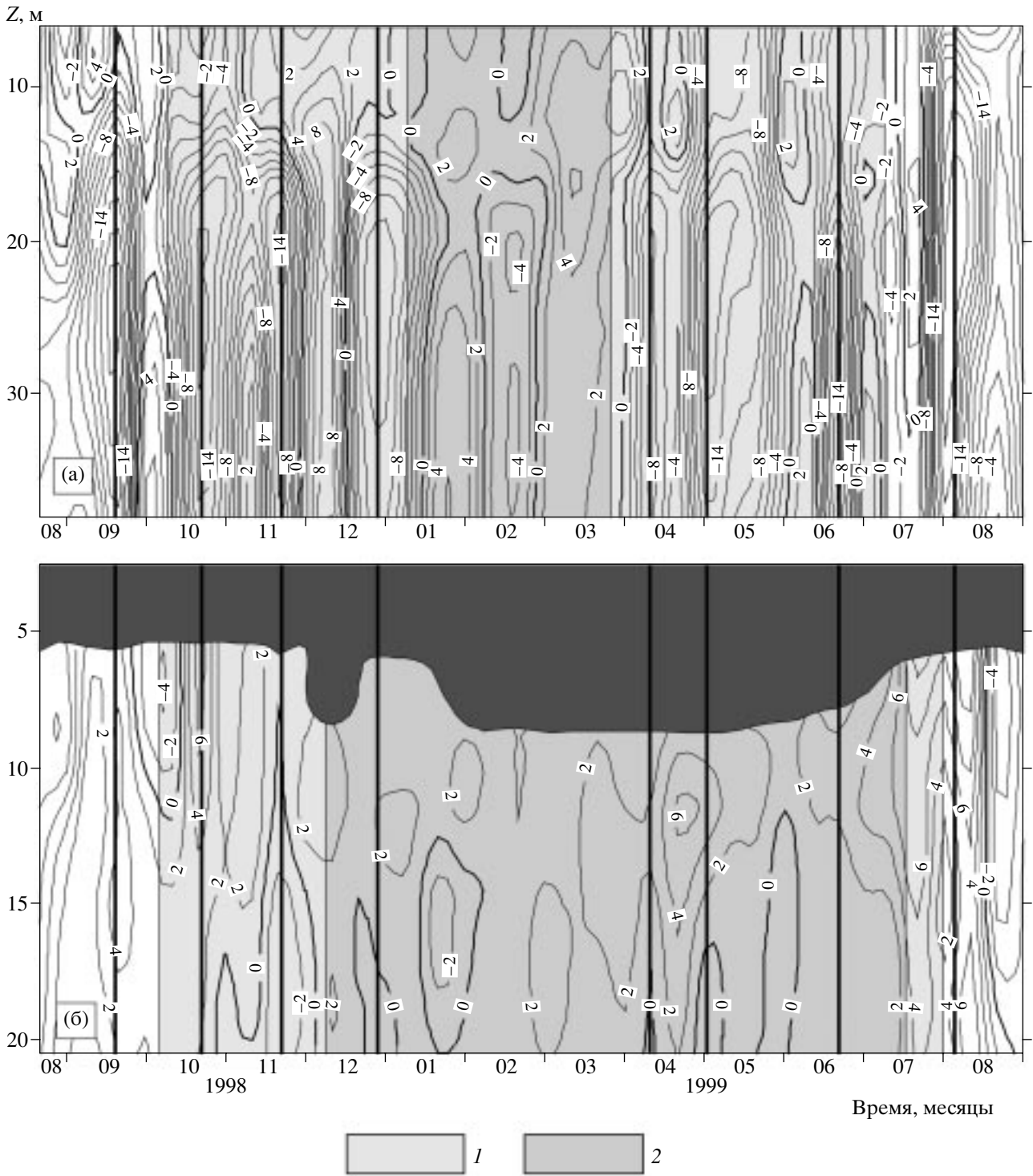


Рис. 2. Ежедекадно осредненные проекции течений на меридиан (плюс – север, минус – юг) на ADCP-станциях YANA (а) и LENA (б). 1 – период времени, когда поверхность моря была покрыта льдом; 2 – период времени, когда поверхность моря была покрыта припайным или сплоченным льдом.

чений обусловлено этими движениями воды. Имея характерную продолжительность от 2 до 7 суток, они главным образом определяют режим циркуляции в районе восточной реликтовой подводной долины р. Лены на протяжении почти все-

го года. По данным осредненных за декаду фактических измерений, меридиональная составляющая южных течений (V_x) в слое ниже пикноклина (14–16 – 44 м) имеет ярко выраженную зависимость от ледовых условий. Она изменяется от

Таблица 1. Характеристики южных течений по данным ADCP-станции YANA

№	Время начала, МСК	Время конца, МСК	Максимальная скорость		Средняя скорость		Глубина макс. скорости, м
			V , см/с	R , град.	V , см/с	R , град.	
3	03.09.98 01:30	06.09.98 01:30	59.0	189	21.8	195	26
4	07.09.98 10:30	10.09.98 19:30	48.3	188	20.5	178	24
6	17.09.98 17:30	21.09.98 08:30	47.9	174	27.6	180	28
19	08.05.99 07:00	15.05.99 01:30	53.7	186	27.5	179	24
21	09.06.99 03:30	17.06.99 15:30	48.8	181	23.4	183	24
25	19.07.99 09:00	25.07.99 23:30	54.3	180	25.9	184	28

Таблица 2. Корреляция между ветром, уровнем моря и течениями для открытой воды (правый верхний угол) и подо льдом (левый нижний угол) на станции YANA

	Уровень	Течение, 12 м	Течение, 24 м	Ветер
Уровень	–	0.24 19 ч, 0.39	0.46 11 ч, 0.52	–0.56 10–11 ч, –0.61
Течение, 12 м	0.28 17 ч, 0.38	–	0.74 5 ч, 0.75	–0.13 60–82 ч, –0.42
Течение, 24 м	0.43 12 ч, 0.48	0.69 3 ч, 0.70	–	–0.24 31 ч, –0.40
Ветер	–0.23 13 ч, –0.26	–0.04 <0.10	–0.14 6–7 ч, –0.15	–

Примечание. Приведены: коэффициент корреляции на нулевом сдвиге по времени, сдвиг по времени (ч) и соответствующий ему максимальный коэффициент корреляции соответственно.

20–22 см/с при открытой воде до 4–8 см/с под дрейфующими не сплоченными льдами и до полного отсутствия под сплоченными или припайными льдами (рис. 2а). Максимальные скорости наблюдаются на глубине 20–25 м. Поверхностный слой воды по декадно осредненным данным движется в зимний период в среднем в северном направлении со скоростью V до 2 см/с, а летом – в противоположном (южном) направлении со скоростью 4–8 см/с (рис. 2а). Зональная составляющая среднедекадных течений (V_y) в течение всего года не превышает 4 см/с. В зимний период слабые реверсивные течения ($V_x < 2$ см/с) также прослеживаются на станции LENA в придонном слое ниже пикноклина (рис. 2б). Всего за период наблюдений на станции YANA зафиксировано 28 случаев реверсивных течений. Описание шести случаев, когда максимальная скорость превысила 45 см/с, представлено в табл. 1. Развитию южных придонных течений предшествуют штормовые

условия на поверхности моря. За 1–2 часа до начала усиления южного течения в придонном слое, поверхностный слой воды до глубины пикноклина движется в северном направлении со скоростью до 50 см/с. Через 1–2 суток направление течения в поверхностном слое изменяется на противоположное.

О возможности существования реверсивных течений в морях российской Арктики [9] и, в частности, в западной части моря Лаптевых [10], говорилось и ранее. Реверсивные придонные течения в юго-западном направлении со скоростью до 100 см/с неоднократно фиксировались на шельфе Чукотского моря в каньоне Барроу [11, 12]. Высокая обратная корреляция с местным ветром позволила предположить, что эти течения имеют апвеллинговую [12], а не волновую [11] природу. Повторяемость и интенсивность реверсивных (апвеллинговых) течений в каньоне Барроу, как и

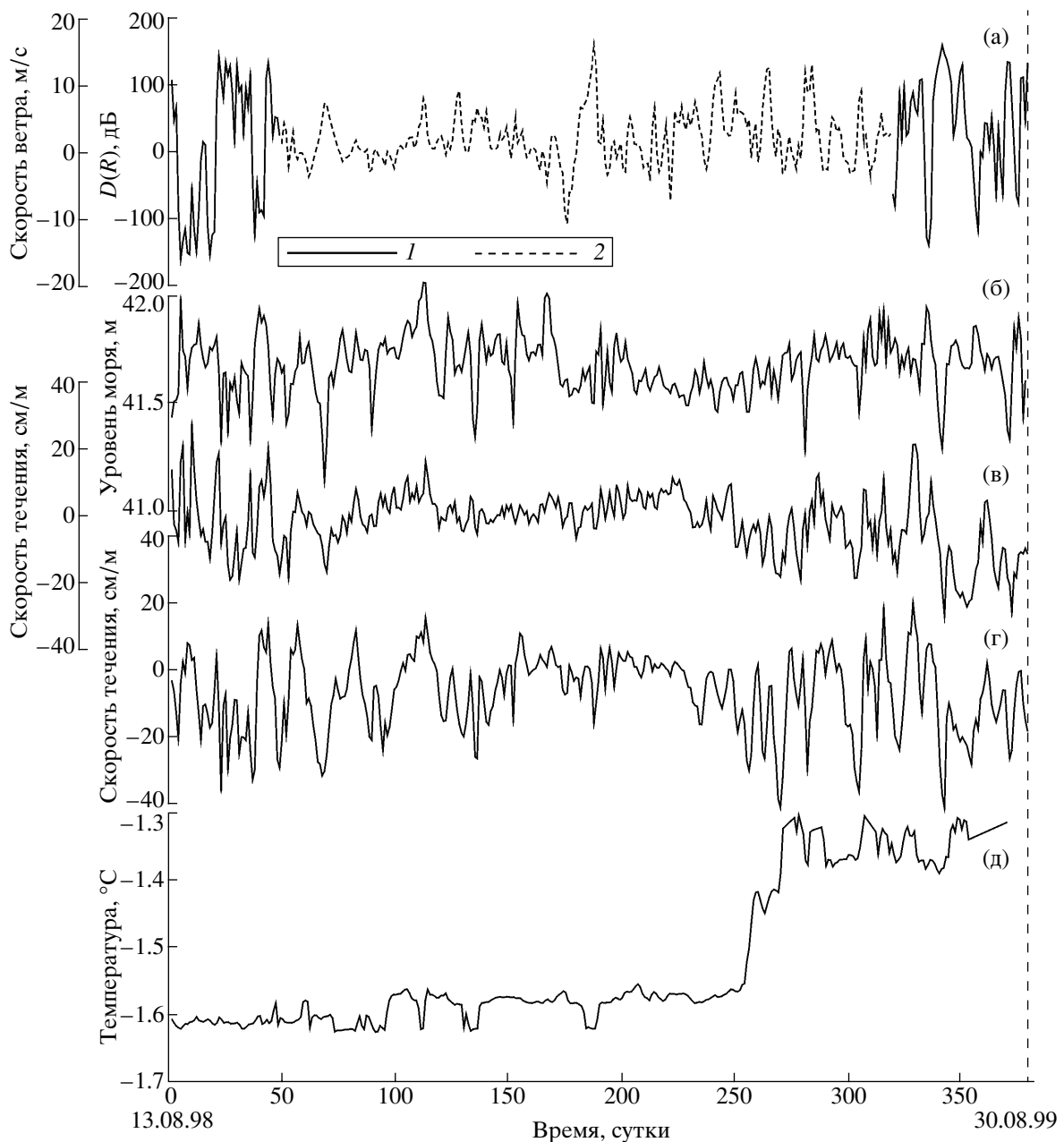


Рис. 3. Временная изменчивость проекции на меридиан суточного ветра (а), прошедших высокочастотную фильтрацию записей уровня моря (б) и проекций на меридиан течений на горизонте 12 м (в) и 24 м (г), придонной температуры воды (д) с 13 августа 1998 г. по 30 августа 1999 г.

в восточной части моря Лаптевых, заметно уменьшаются в зимний период подо льдом [11]. Для исследования взаимосвязи между ветром и течениями для периода времени, когда станция YANA находилась подо льдом (с 6 октября 1998 г. по 15 июля 1999 г.), был использован осредненный за сутки ветер на метеостанции о. Котельный (поз. 2 на рис. 3а). Для летнего периода, когда ледяной покров не вносит искажений в отраженный акустический сигнал, для определения местного ветра были использованы непосредственно

ADCP-измерения согласно способу, предложенному в [13]. Для этого периода времени вместо скорости ветра использована интенсивность ослабления отраженного доплеровского излучения (поз. 1 на рис. 3а). Результаты взаимно корреляционного анализа проекции суточного ветра и профильтрованных течений на направление оси долины (168°) для условий открытой воды и подо льдом представлены в табл. 2.

На рис. 3б изображена STD-запись колебаний уровня моря, предварительно профильтрованная

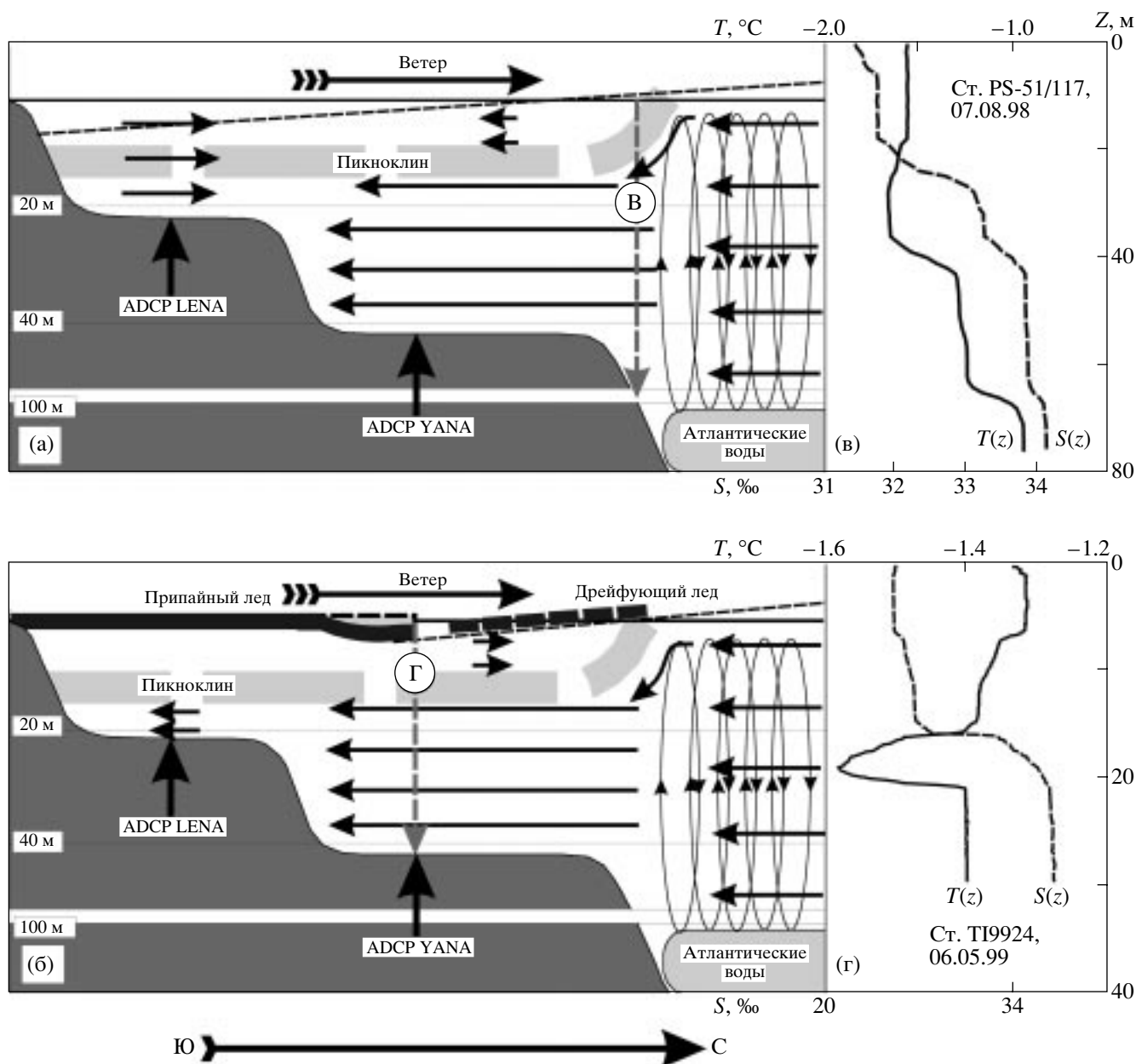


Рис. 4. Схема формирования реверсивных течений летом (а) и зимой (б), и характерные вертикальные распределения температуры и солености на станциях PS-51/117, август 1998 г., экспедиция TRANSDRIFT V (в) и TI9924, май 1999 г., экспедиция TRANSDRIFT VI (г)

для исключения приливной компоненты. Амплитуда непериодических колебаний уровня в 3–5 раз превышает типичный диапазон приливных колебаний (20 см), достигая 80 см. Непериодические колебания уровня так же, как и реверсивные течения, имеют сезонный ход. Минимальные значения уровня приурочены к ветрам южных направлений и обратно, максимальные – к ветрам северных румбов. Взаимо-корреляционные характеристики непериодических вариаций уровня, проекций ветра, и течений на горизонтах 12 и 24 м приведены в табл. 2. Анализ записей уровня обнаруживает

механизм, посредством которого ветер формирует реверсивную циркуляцию в районе подводной долины р. Лены. Летом под воздействием сильно-го ветра с юга в южной части моря разовьются устойчивые ветровые течения, направленные на север (рис. 4а). В условиях мелководья (станция LENA) эти течения распространяются от поверхности до дна. Вследствие этого в центральной части моря (станция YANA) возникают баротропные деформации (понижения) уровня моря, которые достигают 84 см. Компенсационные южные апвеллинговые течения со скоростью до 59 см/с

быстро стремятся нивелировать возникшие деформации уровня (рис. 4а). Они достигают максимума через 11 ч после начала деформации уровня. Зимой припайный лед распространяется в море Лаптевых далеко от береговой черты (рис. 1б, рис. 4б). Он полностью экранирует воздействие ветра на водную толщу. Вследствие этого ветровые течения на станции LENA отсутствуют. Дрейфующий лед ослабляет воздействие ветра на циркуляцию в поверхностном слое на величину до 50% [12]. Поэтому в зимний период реверсивные течения значительно ослаблены, либо отсутствуют полностью при высокой сплоченности льда (рис. 3а). Из-за экранирующего влияния припайного льда на станции LENA внешние воздействия практически исключены. Это позволяет зарегистрировать здесь реверсивные течения с севера, достигающие мелководья (рис. 2б, 4б).

Донные STD-записи зарегистрировали увеличение придонной температуры на величину до 0.2°C в конце апреля–начале мая 1999 г. (рис. 3д), совпадающие с периодом интенсификации юго-восточного ветра. На STD-зондировании на станции TI9924 (экспедиция TRANSDRIFT VI, рис. 1б), которое по времени совпало с возникновением реверсивного течения, на глубине пикноклина также было зарегистрировано увеличение (инверсия) температуры на 0.18°C (рис. 4г). В конце апреля 1999 г. сильный ветер привел к формированию в районе станции YANA больших пространств открытой воды в заприпайной полынье, и резкой интенсификации реверсивных течений. Они и способствовали адвекции относительно теплых вод с севера на юг по подводной долине р. Лена. Случаи увеличения придонной температуры воды, связанные с адвекцией атлантических вод апвеллинговыми течениями, неоднократно наблюдались в каньоне Барроу [11]. Хотя известно, что теплые атлантические воды в море Лаптевых расположены на глубинах ниже 80–100 м [15], в экспедиции TRANSDRIFT V летом 1998 г. на океанографической станции PS-51/117 (рис. 1а) обнаружено увеличение температуры воды уже с 37 м (рис. 4в). Вероятно, увеличение температуры на этих глубинах вызвано теплообменом атлантических вод с вышележащими слоями воды. Адвекция этих теплых вод на юг реверсивными течениями приводит к формированию инверсий в вертикальном распределении температуры в слое ниже пикноклина (рис. 4г). Подобные инверсии наблюдались и на станциях YS9910 и YS9920 (рис. 1а) в экспедиции TRANSDRIFT VII летом 1999 г. Другим следствием реверсивных течений является ресуспендизация донных осадков. Она была неоднократно зарегистрирована на ADCP-записях в виде резкого ослабления отраженного доплеровского излучения в придонном слое, которое совпадало по времени с возникновением реверсивных течений.

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы. Впервые в морях шельфовой зоны российской Арктики в придонном слое ниже пикноклина инструментально зарегистрированы апвеллинговые течения в юго-восточном направлении со скоростью до 59 см/с. Эти течения определяют циркуляцию вод в районе наблюдений в течение большей части года. Они имеют ярко выраженную сезонность и полностью отсутствуют при высокой сплоченности морского льда в зимний период. Причиной формирования реверсивных течений являются ветровые деформации уровня до 84 см, возникающие при сгонных ветрах юго-восточных направлений. Таким образом, ветровые баротропные деформации уровня моря являются определяющими в формировании циркуляции вод в этом районе моря. Апвеллинговые течения осуществляют адвекцию относительно теплых вод с севера в слое 20–40 м. Это является косвенным свидетельством вертикального теплообмена между атлантическими водами и вышележащими слоями воды на севере моря Лаптевых. Вероятно, реверсивные течения типичны для районов подводных реликтовых речных долин на востоке моря Лаптевых. Эти районы моря можно рассматривать как зоны наиболее интенсивного взаимодействия между водами Северного Ледовитого океана и моря Лаптевых.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки РФ и Федерального министерства науки, технологий и высшего образования Германии в рамках стипендиальной программы Российско-германской лаборатории Полярных и морских исследований им. О.Ю. Шмидта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Евгенов Н.И., Кунецкий В.Н.* Научные результаты полярной экспедиции на ледоколах “Таймыр” и “Вайгач” в 1910–1915 гг. Л.: Наука, 1985. 184 с.
2. *Добровольский А.Д., Залогин Б.С.* Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
3. *Pavlov V.K., Timokhov L.A., Baskakov G.A. et al.* Hydrometeorological Regime of the Kara, Laptev, and East-Siberian Seas. Seattle: Technical Memorandum APL-UW TM1-96, APL Univ. Wash (D.C.): Wash. 1996. 179 p.
4. *Pavlov V.K., Pavlov P.V.* Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History. В.: Springer, 1999. P. 3–16.
5. *Ashik I., Dvorkin Y., Vanda Y.* Ibid. P. 37–41.
6. *Proshutinsky A.U., Johnson M.A.* // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № C6. P. 12,493–12,514.
7. *Гудкович З.М., Прошутинский А.Ю.* // Тр. ААН ИИ. 1988. Т. 413. С. 85–95.
8. *Visbeck M., Fischer J.* // J. Atmosph. Technol. 1995. V. 12. № 1. P. 141–149.

9. *Мустафин Н.В.* // Проблемы Арктики и Антарктики. 1970. Т. 34. С. 5–12.
10. *Антонов В.С.* // Тр. ААНИИ. 1961. Т. 213. С. 5–37.
11. *Aagaard K., Roach A.T.* // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. № C10. P. 18,163–18,175.
12. *Weingartner T.J., Cavalieri D.J., Aagaard K., Sasaki Y.* // *Ibid.* 1998. V. 103. № C4. P. 7647–7661.
13. *Schott F.* // *Ibid.* 1989. V. 94. № C6. P. 8313–8321.
14. *Hunkins K.* // *Ibid.* 1975. V. 80. № 24. P. 3425–3433.
15. *Никифоров Е.Г., Шнайхер А.О.* Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 269 с.