

# Морские, речные и озёрные льды

УДК 37.25.15

doi:10.15356/2076-6734-2016-3-387-398

## Динамика кромки заприпайной полыньи в Обской губе и прогноз её широтного положения

© 2016 г. А.В. Попов<sup>1\*</sup>, Н.В. Кубышкин<sup>1</sup>, А.В. Рубченя<sup>2</sup>, Д.В. Драбенко<sup>1</sup><sup>1</sup>Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург;<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Санкт-Петербург<sup>1\*</sup>pp6077@mail.ru

### Dynamics of polynya in the River Ob Bay and predicting of its location

A.V. Popov<sup>1</sup>, N.V. Kubishkin<sup>1</sup>, A.V. Rubchenia<sup>2</sup>, D.V. Drabenko<sup>1</sup><sup>1</sup>Arctic and Antarctic Research Institute, St.-Petersburg, Russia<sup>2</sup>St. Petersburg University, Institute of Earth Sciences, St.-Petersburg, Russia<sup>1\*</sup>pp6077@mail.ru

Received April 12, 2016

Accepted July 8, 2016

**Keywords:** Arctic Oscillation, Kara Sea, North Atlantic Oscillation, Ob Bay, polynya, Yamal, water coast.

#### Summary

Dynamics of the ice edge of (flaw lead) a large polynya in the River Ob Bay was investigated over the period 1997–2016 on the basis of satellite data. More than 800 satellite images were analyzed during the investigation. Relationship between the obtained time series of changing latitude of the ice edge and time series of air temperature, wind and indices of Wangerheim–Girs, the Arctic Oscillation (AO), and North Atlantic Oscillation (NAO) was studied by means of the correlation analysis. The statistical analysis made it possible to reveal that southern position of the ice edge in autumn indicated to warmer winter months. Boundaries of the polynya during every next decade were identically determined by its position during the preceding period, and therewith the pronounced trend of the ice edge shift to south was noticed in 1997–2012. In addition, periodic fluctuations with two different periods were found against the background of trend. During 1996–2006 the fluctuations were quasi-biennial while after 2006 the period of fluctuations increased up to 4–5 years. Effort to predict the ice edge position aimed at determination of the polynya boundaries in January–February of 2016 was undertaken; data on the air temperature and latitude of the ice edge position for preceding period were used as the predictors. The difference between the prediction and actual data was equal to  $0.01 \div -0.43$  of latitude with the average value for six decades equal to  $0.11^\circ$ . Analysis of inter-annual variability of the edge position indicated that the most close relationship took place with the Wangerheim–Girs index  $E$  in May (coefficient of correlation  $r = -0.73$ ). Maximal values of  $r$  exceeding  $\pm 0.7$  were calculated for the Arctic Oscillation indices in February with a positive shift of one year. When investigating long-term large-scale changes of climatic parameters, analysis of anomalies of average latitude values of the polynya southern boundary had been performed. This allowed to reveal that period of 2005–2006 was a point of inflection. This substantiates the known thesis (conclusion) that a well developed polynya exerts the warming effect on adjacent territories.

Поступила 12 апреля 2016 г.

Принята к печати 8 июля 2016 г.

**Ключевые слова:** Арктическая осцилляция, заприпайная полынья, индекс Вангенгейма–Гирса, Карское море, кромка льда, Обская губа, припай, Северо-Атлантическое колебание, Ямал.

На основе спутниковых данных рассматривается динамика кромки заприпайной полыньи в Обской губе за период 1997–2016 гг. Граница полыньи в каждую последующую декаду почти однозначно определялась её положением в предшествующий период. Анализ межгодовой изменчивости положения кромки показал, что наибольшая связь прослеживается с индексом Вангенгейма–Гирса  $E$  в мае. Максимальные значения  $r$ , превышающие  $\pm 0,7$ , получены для февральских индексов Арктической осцилляции со сдвигом на один год.

#### Введение

Освоение нефтегазовых запасов Ямала и строительство завода по сжижению газа в Сабетте привели к резкому росту транспортной

активности на акватории Обской губы. Авторы работы [1] выполнили анализ особенностей формирования заприпайной полыньи в северной части Обской губы с акцентом на район о. Халэвнго на северной границе губы – место,

планируемое для строительства завода для сжижения природного газа. Однако в 2010-е годы место для этого завода было перенесено южнее — к посёлку Сабетта, где в настоящее время идёт строительство морского порта. С 2011 г. здесь происходит круглогодичная навигация. В течение всего периода проектирования и портового строительства выполнялся подробный мониторинг ледовых процессов в северной части губы с использованием спутниковых снимков и полевых наблюдений. Обзор спутниковой информации за 1997–2006 гг., выполненный в работе [1], актуализирован в настоящей статье с привлечением новых данных — до 2016 г. включительно.

Заприпайные полыньи — неотъемлемая часть зимнего ледово-гидрологического режима арктических морей. Их существование полностью зависит от ветрового режима над морем. Они представляют собой значительные по ширине и протяжённости (от десятков до сотен километров) участки с чистой водой или молодым льдом толщиной от 5 до 30 см, а также зоны редких и разреженных льдов сплочённостью не более 5 баллов, которые образуются между припаем и дрейфующими льдами в холодный период. Обь-Енисейская заприпайная полынья постоянно существует в южной части Карского моря к северу от Обской губы и Енисейского залива. Повторяемость эпизодов существования данной полыньи за период спутниковых наблюдений с 1978 по 2016 г., рассчитанная по декадным данным, изменяется от 16 до 65% в ноябре, до 86–92% в марте при среднем за холодный сезон значении 83%. Устьевая полынья — неотъемлемая часть Обь-Енисейской заприпайной полыньи, поэтому она также квазипостоянна. Исследование динамики границы полыньи имеет несомненный научный и практический интерес.

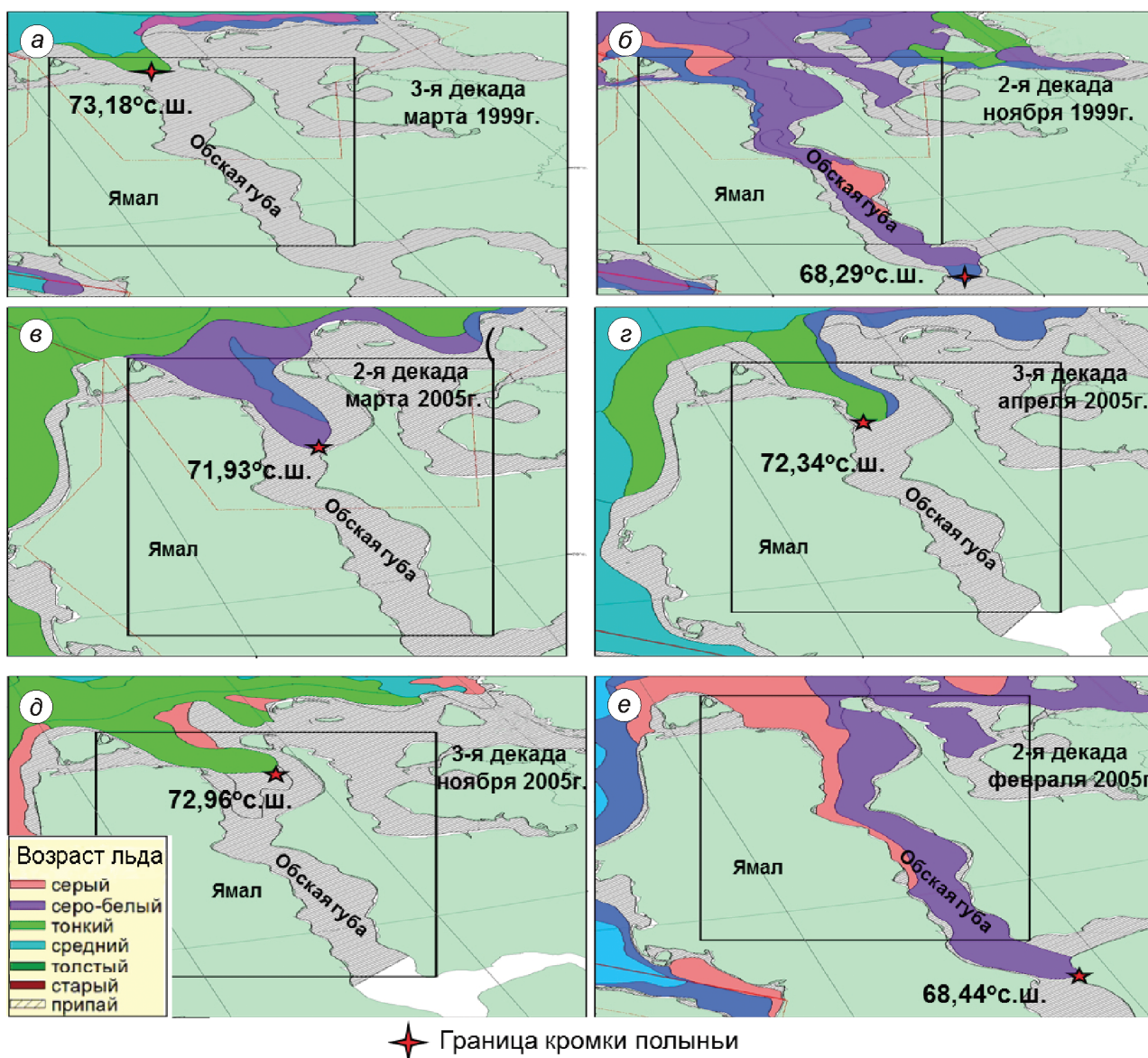
### Материалы и методы

Для определения положения границы полыньи в Обской губе с электронных ледовых карт из архива Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) с использованием ГИС-технологии снимались координаты самой южной точки полыньи. Не-

которые из этих карт представлены на рис. 1. Всего было обработано более 800 карт за все ледовые сезоны (октябрь—июль) за период с 1997 по 2016 г. Наибольший интерес представляют значения широты, так как необходимо знать, насколько далеко на юг или на север распространилась полынья. Для удобства дальнейшей обработки все данные усреднялись по декадам (10 дней). Кроме того, для каждого ледового сезона рассчитаны средние и медианные значения широты южной границы полыньи в северной части Обской губы.

В результате были получены временные ряды двух видов: 1) многолетние ряды значений широты границы полыньи в каждую из декад ледового сезона (октябрь—июль) за период с 1997 по 2015 г.; 2) совокупность рядов, описывающих временную изменчивость в пределах каждого из 18 ледовых сезонов. Статистический анализ всей совокупности данных показал, что самое северное положение границы полыньи отмечалось в третью декаду марта 1999 г. (см. рис. 1, *a*), а самое южное — во вторую декаду ноября 2015 г. (см. рис. 1, *б*). Минимальная амплитуда внутрисезонной изменчивости отмечена в сезон 2004/05 г., когда разница между самым северным и самым южным положением границы полыньи составила всего  $0,41^\circ$  широты (см. рис. 1, *в*, *г*). Наибольшее расхождение положения южной границы полыньи отмечалось в сезон 2009/10 г. — интервал изменений достиг  $4,52^\circ$  широты (см. рис. 1, *д*, *е*). Столь же значительные вариации положения границы полыньи можно ожидать в сезон 2015/16 г. Выяснению причин миграции южной границы полыньи в северной части Обской губы и посвящено настоящее исследование.

Для определения взаимообусловленности изменений положения южной границы полыньи внутрисезонных циклов выполнен корреляционный анализ совокупности многолетних рядов средних за декаду значений широты южной границы полыньи. Взаимное влияние рядов средних за декаду значений широты границы полыньи весьма значительно. Эта зависимость усиливается при переходе от зимы к весне: если во вторую декаду декабря всего четыре из 18 коэффициентов корреляции были значимы и превысили значение 0,6, то со второй декады марта все коэффициенты были значимы, причём 89%



**Рис. 1.** Положение южной границы полыньи в северной части Обской губы:

*a* – самое северное и *б* – самое южное за весь период исследований; амплитуды смещения границы полыньи в течение одного сезона: *в*, *г* – минимальные; *д*, *е* – максимальные

**Fig. 1.** Southern ice edge location of polynya in northern part of Ob Bay:

*a* – most northern and *б* – most southern for all period of research; amplitudes of ice edge shift of polynya during a season: *в*, *г* – minimum; *д*, *е* – maximum; fig. *д* – shows the age of ice (downwards: grey, grey-white, thin, middle, thick, old, fast ice); asterisk at the figure shows the border of lead edge

из них превысили 0,7. Анализ матрицы коэффициентов корреляции показывает, что межгодовая изменчивость ряда средних значений зависит главным образом от межгодовых изменений в январе, второй декаде февраля, первой декаде марта и в конце апреля – начале мая.

Межгодовая изменчивость ряда медианных значений определяется изменениями в январе–апреле при максимальном влиянии рядов во

второй декаде февраля и первой декаде марта, когда коэффициент корреляции составил 0,90–0,93. Фрагмент корреляционной матрицы приведён в табл. 1. Как видно из этой таблицы, со второй декады апреля положение границы полыньи в каждую последующую декаду практически однозначно определялось её положением в предшествующий период – коэффициент корреляции находится в пределах 0,82–0,97.

Таблица 1. Фрагмент корреляционной матрицы коэффициентов корреляции взаимосвязи временных рядов среднедекадных (10 дней) значений широты южной границы полыньи в Обской губе

Месяц/декада*	3/1	3/2	3/3	4/1	4/2	4/3	5/1	5/2	5/3	6/1	6/2	6/3	Среднее	Медиана
3/1	1,00													
3/2	0,75	1,00												
3/3	0,73	0,81	1,00											
4/1	0,62	0,67	0,69	1,00										
4/2	0,64	0,80	0,81	<b>0,97</b>	1,00									
4/3	0,73	0,85	0,86	0,84	<b>0,94</b>	1,00								
5/1	0,45	0,73	0,74	0,63	0,89	<b>0,95</b>	1,00							
5/2	0,46	0,73	0,67	0,55	<b>0,93</b>	0,88	<b>0,96</b>	1,00						
5/3	0,64	0,74	0,72	0,68	0,88	0,89	0,86	0,84	1,00					
6/1	0,53	0,71	0,76	0,70	0,88	<b>0,90</b>	<b>0,92</b>	0,88	<b>0,96</b>	1,00				
6/2	0,64	0,84	0,83	0,77	<b>0,91</b>	<b>0,95</b>	0,88	0,87	0,87	<b>0,94</b>	1,00			
6/3	0,75	0,85	0,73	0,74	0,81	0,82	0,62	0,67	0,76	0,77	0,83	1,00		
Среднее	0,70	0,65	0,64	0,69	0,73	0,82	0,77	0,68	0,72	0,68	0,78	0,68	1,00	
Медиана	<b>0,93</b>	0,74	0,76	0,70	0,78	0,81	0,59	0,59	0,66	0,61	0,80	0,75	0,82	1,00

\*3/1 – первая декада марта, 3/2 – вторая декада марта и т.д. – обозначения в табл. 1–3.

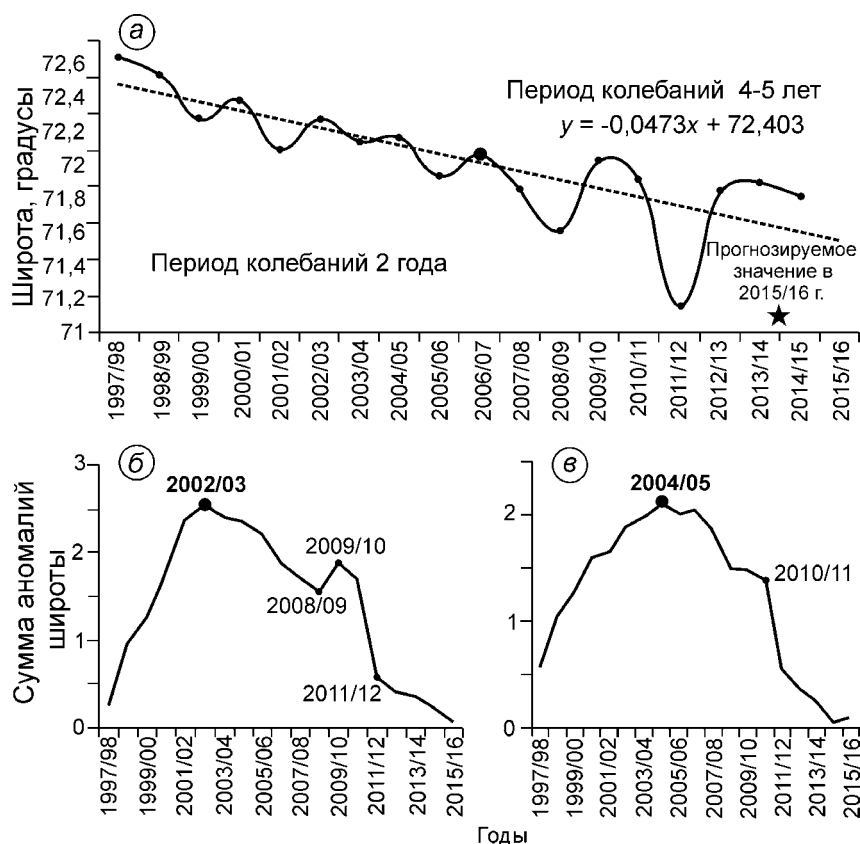
Выявленные зависимости можно использовать для прогнозирования положения кромки с заблаговременностью 5–8 декад, особенно в весенний период, что чрезвычайно важно для прогноза вскрытия Обской губы и планирования летней навигации.

На рис. 2 показаны изменения во времени средних за ледовый период значений широты южной границы полыньи. Отчётливо виден ряд интересных особенностей временной изменчивости. Во-первых, обращает на себя внимание ярко выраженный тренд на смещение границы полыньи к югу. В 1997 г. широта границы составляла 72,51° с.ш., а в 2012 г. – 71,14° с.ш. Во-вторых, на фоне трендового уменьшения широты отмечаются отчётливые периодические колебания, имеющие два различных периода. Как видно на рис. 2, а, с 1997 по 2006 г. наблюдались двухлетние колебания, затем период колебаний скачком увеличился до 4–5 лет. При этом значительно возросла амплитуда колебаний: в начале периода амплитуда составляла всего 0,1–0,2°, а в конце – уже 0,7–0,8°, т.е. увеличилась в 4–8 раз.

При исследовании долгопериодных крупномасштабных изменений климатических параметров часто используется метод построения кривых интегральных аномалий. Временные ряды преобразуются в ряды аномалий, которые затем последовательно суммируются. В ре-

зультате значительных климатических изменений на интегральных кривых формируются точки перегиба, которые характеризуют продолжительную смену знака аномалий. При анализе ансамбля климатически значимых параметров взаимное расположение точек перегиба на временной оси позволяет выделить наиболее значимые процессы и определить их последовательность. Как видно на рис. 2, б, в, ряды аномалий медианных (см. рис. 2, б) и средних (см. рис. 2, в) значений широты южной границы полыньи в Обской губе преобразуются в интегральные кривые разными точками перегиба. Для медианных значений изменение знака интегральных аномалий произошло в ледовый сезон 2002/03 г., а для средних значений – в ледовый сезон 2004/05 г. До этого наблюдался рост суммарных аномалий, т.е. аномалии широты положения кромки имели положительный знак, а после знак аномалии изменился на отрицательный. В соответствии с этим граница полыньи сместилась на юг.

Положение границы полыньи зависит как от местных метеоусловий, так и от межгодовой изменчивости крупномасштабной циркуляции атмосферы. В нашем случае при изучении динамики кромки в северной части Обской губы можно было бы ожидать влияния стокового течения р. Обь. Течения на акватории северной части Обской губы представляют собой сумму



**Рис. 2.** Изменение во времени средних за ледовый период значений широты южной границы полыньи и интегральные кривые значений широты.

Положение северной границы полыньи (а), интегральные кривые аномалий медианных (б) и средних (в) значений широты

**Fig. 2.** Dynamic of mean values of latitude of southern edge of polynya and integral curves of latitude. Northern ice edge of polynya (a), integral curves of anomalies (b) and mean (v) values of latitude

периодической приливо-отливной и непериодической составляющих скоростей течения, являющихся векторной суммой стокового, ветрового и плотностного течений.

Модельные оценки показывают, что в зимний период во всех расчётных точках мода находится в диапазоне 0–5 см/с. Для зимнего периода характерны пониженный речной сток и наличие плотностных течений у дна на значительной части акватории северной части Обской губы. Если рассматривать тепловой сток р. Обь, то он начинает проявляться лишь после прохождения волны паводка, которая достигает района исследований лишь во второй половине июня. Изучение влияния непериодических течений на динамику кромки в условиях отсутствия временных рядов натуральных наблюдений за течениями не представляется возможным. Однако, как будет показано далее, даже

без учёта влияния стокового течения реки получены вполне удовлетворительные результаты прогноза положения границы полыньи.

Для объяснения выявленных особенностей изменения широты южной границы полыньи во времени выполнен корреляционный анализ взаимосвязи описанных выше временных рядов и рядов метеопараметров на о. Белый, а также индексов, характеризующих макроциркуляционные процессы: Вангенгейма–Гирса *E*, Северо-Атлантического колебания (САК), Арктической осцилляции (АО). Расчёты выполнялись для двух различных вариантов временных рядов – ежедекадных и ежегодных. В первом варианте рассматривалась взаимосвязь между ежегодными рядами декадных данных. При анализе результатов этих расчётов установлены высокоррелированные связи, причём коэффициент корреляции значительно увели-

Таблица 2. Фрагмент матрицы коэффициентов корреляции синхронной взаимосвязи временных рядов среднедекадных значений широты южной границы польньи в Обской губе и рядов среднедекадных значений температуры на о. Белый

Месяц/декада		Средняя за декаду широта южной границы польньи							
		12/2	12/3	1/2	2/2	2/3	3/2	5/1	6/1
Средние за декаду значения температуры	12/2	<b>0,70</b>	0,35	0,54	0,88	0,72	0,63	0,69	-0,48
	12/3	0,61	0,34	0,49	0,59	0,50	0,68	0,45	-0,45
	1/1	0,65	0,25	0,30	<b>0,75</b>	0,58	0,60	0,57	-0,40
	1/2	0,65	0,60	0,66	<b>0,83</b>	0,67	<b>0,72</b>	<b>0,70</b>	-0,02
	1/3	0,67	0,27	0,33	<b>0,75</b>	0,62	0,66	0,59	-0,34
	2/1	<b>0,79</b>	0,33	0,49	<b>0,84</b>	0,69	<b>0,74</b>	<b>0,70</b>	-0,41
	2/2	0,64	0,35	0,40	<b>0,84</b>	<b>0,75</b>	0,55	0,62	-0,48
	3/1	0,49	0,29	0,35	<b>0,71</b>	0,60	0,63	0,45	-0,56
	3/2	0,69	0,26	0,47	<b>0,78</b>	0,69	0,65	0,67	-0,52
	3/3	0,37	0,35	0,49	0,53	0,69	0,58	0,38	-0,45
	4/1	0,31	-0,13	0,18	0,50	0,52	0,39	0,22	<b>-0,80</b>
	4/2	<b>0,72</b>	0,42	0,65	<b>0,89</b>	<b>0,82</b>	<b>0,72</b>	0,68	-0,39
	4/3	0,63	-0,01	0,21	0,58	0,58	0,48	0,49	-0,60
	5/2	0,46	0,05	0,23	0,54	0,59	0,63	0,33	-0,50
5/3	0,64	0,00	0,25	0,69	0,60	0,51	0,56	-0,64	
6/1	<b>0,72</b>	0,15	0,32	<b>0,79</b>	0,60	0,63	0,62	-0,46	

чивается при сдвиге рядов по шкале времени. Фрагмент матрицы коэффициентов корреляции связи изменений среднедекадной температуры и широты южной границы представлен в табл. 2, показаны максимальные коэффициенты корреляции для синхронной связи рядов.

Для синхронной связи только 29% коэффициентов в корреляционной матрице (размером 18×18) превышали величину  $R_{кр} = 0,468$ , т.е. были статистически значимы, и всего семь из них превышали 0,80. Проводился также корреляционный анализ с различными сдвигами. При опережающем сдвиге температурных рядов относительно широтных на восемь декад таких коэффициентов было уже 90,4%, причём более 67,5% из них превышает значение 0,6. В этом случае уже 52 коэффициента были больше 0,8, а 12 из них – даже более 0,9. Все значимые коэффициенты в данном варианте расчётов положительны. Получен, на первый взгляд, парадоксальный результат: чем севернее расположена граница польньи в Обской губе, тем выше температура воздуха на о. Белый. Очевидно, это объясняется тем, что с южными ветрами в данный район поступают более тёплые воздушные массы. При обратном сдвиге – опережающем влиянии широты – увеличение числа статисти-

чески значимых коэффициентов корреляции начинает проявляться лишь при сдвиге на пять декад (45%) и при сдвиге в семь декад уже составляет 85%, при этом 37,7% коэффициентов превышают 0,6 по модулю. Начиная со сдвига в пять декад, все значимые коэффициенты имеют отрицательный знак.

Таким образом, более тёплый температурный режим в конце осени приводит к формированию более южного положения границы польньи в зимние месяцы. Выявленная зависимость, вместе с отмеченной ранее взаимобусловленностью положения границы в отдельные декады, может быть использована для прогнозирования положения кромки с заблаговременностью 5–8 декад. В декабре 2015 г. мы выполнили такого рода прогноз для определения границы польньи в январе–марте, используя в качестве предиктора данные о температуре и значении широты границы в предшествующий период. Согласно «Наставлению по службе прогнозов...» [2], «количественная оценка прогнозов распределения льда производится в том случае, если прогноз дается в виде конкретных цифровых характеристик на основании разработанной методики». Разница между прогнозом и фактическими данными составила  $0,01 \div -0,43^\circ$

широты или 1,1–48 км при среднем значении за шесть декад  $-0,11^\circ$  широты (12,3 км) и допустимой ошибке положения кромки  $\sigma_{кр} = 0,35$ .

### Обсуждение результатов

Само определение заприпайной полыньи указывает на её связь с ветром. Как отмечалось ранее, ближайшая метеостанция с продолжительными рядами находится на о. Белый. Для удобства анализа и сравнимости результатов срочные значения направления и модуля скорости ветра были усреднены по декадам за ледовые периоды с октября по июль. Анализ частоты распределения направления и модуля скорости ветра в ледовые сезоны за период 1997–2015 гг. показал преобладание умеренных ветров южного направления. В исследуемом районе преобладают ветра южных румбов – 65% всех ветровых переносов находятся в диапазоне  $160\text{--}220^\circ$ . При этом скорость ветра в диапазоне 4–7 м/с отмечалась в 88% случаев, а скорость 5–6 м/с получена в 57% средних за декаду данных. Временной ряд средних значений направления, рассчитанных для каждого холодного сезона, показывает устойчивые ветра в диапазоне  $157\text{--}178^\circ$  (амплитуда  $21^\circ$ ) в период с 1997 по 2009 г., далее можно отметить некоторый разворот к западу и увеличение диапазона изменчивости ( $161\text{--}206^\circ$ , амплитуда  $45^\circ$ ).

Изменение во времени медианных значений модуля скорости ветра характеризуется понижением скорости ветра на начальном отрезке исследуемого периода (1997–2003 гг.): скорость ветра снизилась с 6,3 до 4,8 м/с. Затем можно отметить некоторое увеличение скорости: к 2009 г. медианные значения модуля скорости ветра увеличились до 5,5 м/с. Далее, до конца исследуемого периода отмечались периодические колебания с амплитудой 0,5–0,7 м/с и некоторой тенденцией к росту скорости. Корреляционный анализ не выявил значимых коэффициентов корреляции связи изменений широты южной границы полыньи и параметров ветровых переносов.

Во втором варианте корреляционного анализа рассматривалась межгодовая изменчивость для каждой конкретной декады. В данном варианте расчётов получены корреляционные матри-

цы для синхронной связи рядов значений широты в декады от 12/2 (вторая декада декабря) до 6/1 (первая декада июня) их средних и медианных значений и индексов циркуляции атмосферы с января по июль и их средних и медианных значений. Аналогичные матрицы получены как при опережающем влиянии широтных рядов на 1–2 года, так и при опережающем влиянии рядов циркуляционных индексов.

Рассмотрим связь изменения положения границы полыньи и атмосферных макроциркуляционных индексов. Корреляционный анализ позволил сделать определённые выводы (табл. 3). При синхронной связи высокие отрицательные коэффициенты (более 0,7) отмечаются между индексом Вангенгейма–Гирса  $E$  и широтным положением кромки во вторую и третью декады апреля ( $-0,73$ ). В случае апрельского индекса САК4 максимальное значение коэффициента ( $-0,73$ ) получено с динамикой кромки в первую декаду февраля, в случае апрельского индекса АО4 связь несколько ниже ( $-0,62$ ). При опережающем влиянии индексов на один год количество значимых коэффициентов корреляции растёт. Максимальные коэффициенты, превышающие  $\pm 0,7$ , получены для февральских индексов. Связь между САК и расположением кромки в основном положительна и достигает 0,79. Положительный знак коэффициентов показывает, что увеличение индексов в феврале приводит к смещению границы полыньи к северу в соответствующие декады. Выявленные зависимости можно использовать для долгосрочного прогноза положения полыньи.

Устьевая полынья на севере Обской губы представляет собой часть более обширной Обь-Енисейской полыньи. Временная изменчивость исходного ряда медианных значений площади полыньи (рис. 3, а) характеризуется теми же особенностями, что и изменения широтного ряда, описанные ранее. В сезон 1997/98 г. медианное значение площади Обь-Енисейской полыньи составило  $8485 \text{ км}^2$ , а в сезон 2014/15 г. уже  $20\,071 \text{ км}^2$ . С сезона 1997/98 г. по сезон 2004/05 г. наблюдались двухлетние колебания, затем период колебаний скачком увеличился до 4–5 лет. При этом значительно возросла амплитуда колебаний. В начале периода амплитуда составляла всего  $5770\text{--}8030 \text{ км}^2$ , а в конце уже  $10\,175\text{--}17\,090 \text{ км}^2$ , т.е. увеличилась в 2–3 раза.

Таблица 3. Фрагмент матрицы коэффициентов корреляции взаимосвязи временных рядов среднедекадных значений широты южной границы польны в Обской губе и временных рядов макроциркуляционных индексов (индекса Вангенгейма–Гирса  $E$ , индекса Арктической осцилляции (АО) Северо-Атлантического колебания (САК) (приведены только значимые индексы  $\geq \pm 0,5$ )

Циркуляционные индексы		Широта южной границы польны в Обской губе														
		1/1	1/3	2/1	2/2	2/3	3/1	3/2	3/3	4/2	4/3	5/2	5/3	6/1	Среднее	Медиана
$E_2^*$	$E$ опережает на 1 год	-0,54	-0,51				-0,53	<b>-0,71</b>	-0,54	-0,52	-0,52	-0,59	-0,59	-0,55		-0,53
Среднее $E$				-0,56	-0,51		-0,64	-0,61	-0,63	-0,55	-0,61		-0,51			-0,61
Медиана $E$							-0,51	-0,68			-0,51					
Форма $E_2$	Синхронно		-0,50	-0,57							-0,53				-0,57	-0,53
Форма $E_5$						-0,60	-0,53			<b>-0,73</b>	<b>-0,73</b>		-0,61	-0,60		-0,57
АО2	АО опережает на 1 год		0,66	0,48	<b>0,71</b>	<b>0,81</b>	<b>0,70</b>	0,59	0,53	<b>0,71</b>	<b>0,74</b>	0,65	0,67	0,58	<b>0,73</b>	<b>0,77</b>
АО4	Синхронно		-0,50	-0,62												
АО2	АО отстает на 2 года	<b>0,78</b>			0,51				0,63	0,58	0,55					
САК2	САК опережает на 1 год		0,60		0,62	<b>0,71</b>	<b>0,74</b>	0,55	0,45	0,69	<b>0,79</b>	0,54	<b>0,70</b>	0,60	<b>0,75</b>	<b>0,73</b>
САК4	Синхронно		-0,55	<b>-0,73</b>	-0,53		-0,59									-0,60
САК2	САК отстает на 2 года	<b>0,70</b>			0,53	0,57			0,57	0,60	0,50					

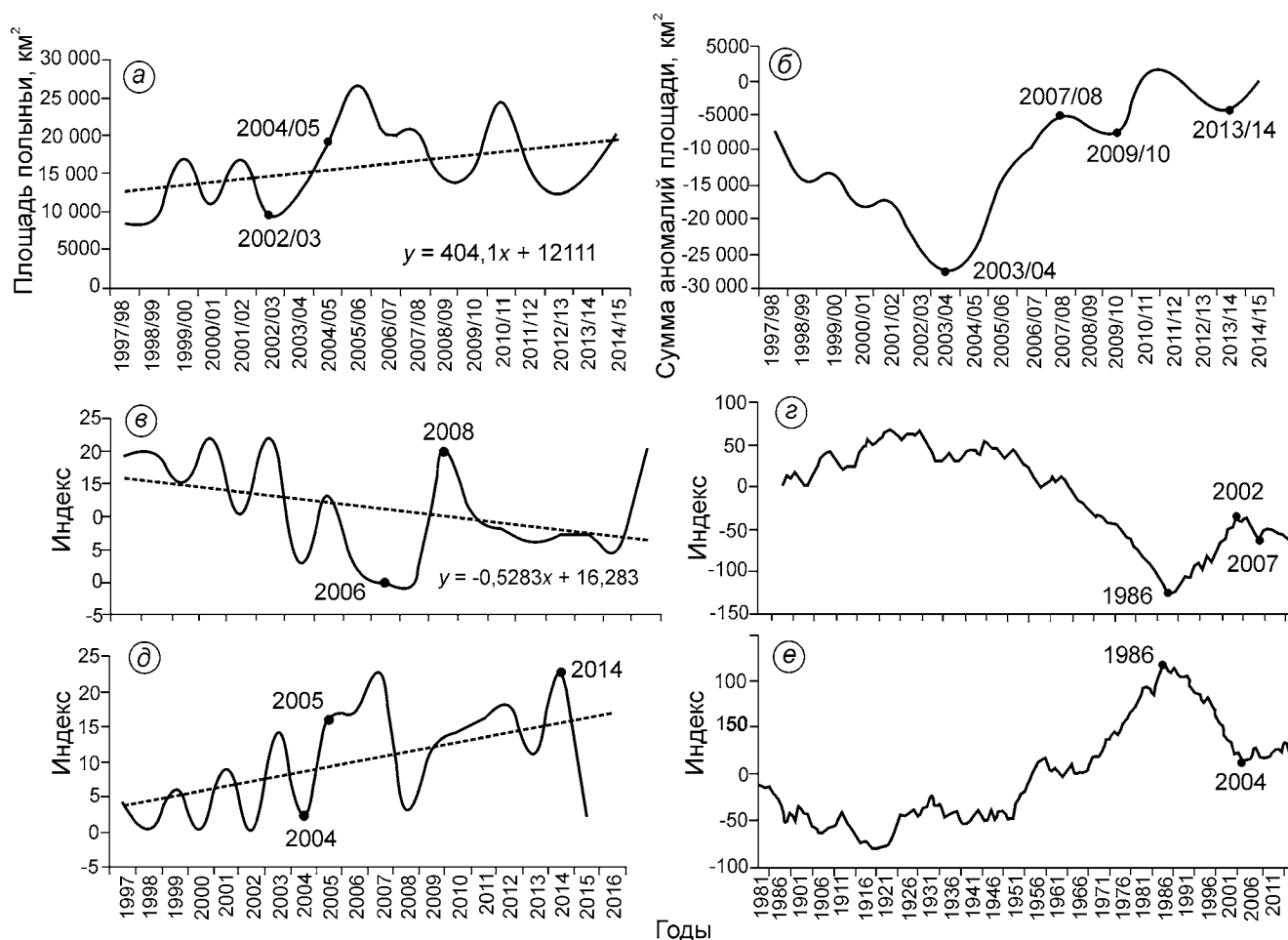
\*Цифры у индексов указывают на месяц года.

Рассмотрим соответствие изменений интегральных кривых широты кромки (см. рис. 2, б, в) и площади польны (см. рис. 3, б). Сравнение позволяет сделать тривиальный вывод: ход интегральных кривых противоположен, т.е. уменьшению площади польны соответствует смещение её южной границы на север и, наоборот, смещение границы польны на юг сопровождается увеличением площади польны. Как видно из этих рисунков, смена знака аномалии на интегральной кривой площади Обь-Енисейской заприпайной польны произошла на один год раньше. До ледового сезона 2003/04 г. преобладали отрицательные аномалии площади, а после этого началось нарастание положительных аномалий и интегральная кривая резко пошла вверх (см. рис. 3, б). На интегральной кривой аномалий средних значений широты южной границы польны смена знака произошла в сезон 2004/05 г. Таким образом, можно сделать вывод о зависимости положения южной границы польны от площади Обь-Енисейской польны, а не наоборот.

Совместный анализ описанных здесь изменений интегральных кривых широты кромки, площади польны и изменения во времени индекса Вангенгейма–Гирса  $E$  в феврале (см. рис. 3, в) позволяет сделать вывод, что отмеченные особенности межгодовой изменчивости площади Обь-Енисейской польны и широты её южной границы в Обской губе в значительной степени определяются изменениями индексов Вангенгейма–Гирса  $W_2$  (в) и  $E_2$  (д) в феврале. Как видно на рис. 3, в–е, временной ход индексов противоположен. Смена периода и амплитуды колебаний произошла в 2006 г. (см. рис. 3, в, д).

Корреляционный анализ позволил установить взаимосвязь изменений положения южной границы польны и различных циркуляционных индексов. Процессы западной зональной  $W$ -формы макроциркуляции атмосферы характеризуются относительно незначительным развитием исландского минимума, на всём полушарии преобладают зональные смещения барических образований. При данной форме макроциркуляции в толще тропосферы формируются длинные волны малой амплитуды и зональное расположение областей аномалий температуры и давления. Над континентом об-





**Рис. 3.** Изменение во времени медианных значений площади Обь–Енисейской полыньи (ОЕП) и индексов макроциркуляции Вангенгейма–Гирса.

Временной ход медианных значений площади ОЕП (а); индексов макроциркуляции Вангенгейма–Гирса в феврале  $W_2$  (в) и  $E_2$  (д); соответствующие интегральные кривые: медианных значений площади ОЕП за ноябрь–май (б); индексов  $W_2$  в феврале (е) и  $E_2$  (е)

**Fig. 3.** Temporal dynamic of mean values of Ob-Enisey polynya (OEP) and Wangengem-Girs indexes. Temporal dynamic of mean values of Ob-Enisey polynya (OEP) (a); Wangengem-Girs index  $W_2$  in February (в) and  $E_2$  (д); integral curves of mean polynya area in November–May (б); Wangengem-Girs index  $W_2$  (е) and  $E_2$  (е)

разуется область положительных аномалий температуры воздуха, а в Арктике – отрицательных. Циклоны из района исландского минимума смещаются в восточном направлении в зоне средних широт. Как показал А.А. Гирс [3–5], при процессах зональной формы  $W$  формируются отрицательные аномалии давления в северной части атлантико-евразийского сектора; ослаблено поступление тёплых вод в системе Гольф-стрима; в Северной Атлантике формируется отрицательная аномалия температуры воды [6]; происходит понижение температуры атлантических вод в западном секторе Арктики. Кроме того, при преобладании процессов зональной

формы  $W$  формируется отрицательная фаза Арктической осцилляции. Как видно из рис. 3, з, изменение индекса макроциркуляции Вангенгейма–Гирса западного зонального переноса  $W$  в феврале на интегральной кривой характеризовалось длительным нарастанием положительных аномалий с 1986 по 2002 г., затем произошла резкая смена знака аномалии.

Процессы восточной формы макроциркуляции  $E$  характеризуются максимальным развитием исландского минимума, наличием стационарных волн большой амплитуды в толще тропосферы и меридиональным расположением областей аномалий температуры и давления.

Над Европейским континентом развит стационарный антициклон, который блокирует западно-восточное смещение циклонов. Циклоны из района исландского минимума смещаются в северо-восточном направлении и нередко достигают Северного полюса.

При процессах меридиональной формы  $E$  [3–5] в восточной части Атлантического океана создаются условия, при которых здесь устойчиво сохраняются южные ветры; формируются положительные аномалии температуры поверхностных вод в Северной Атлантике [6]; отмечается нагон тёплых вод в северные моря и Арктический бассейн; существенно повышается температура глубинных вод в западном секторе Арктики, что вызывает уменьшение ледовитости Баренцева и большей части Карского морей; происходят адвекция тёплого воздуха и повышение температуры воздуха в Арктике; отмечается циклонический режим погоды в Арктике. Интегральная кривая аномалий индекса восточной формы макроциркуляции  $E$  (см. рис. 3, *д*) отчётливо показывает, что с 1986 по 2004 г. происходило ослабление процессов данной формы циркуляции. С 2005 г. появились положительные аномалии индекса  $E$ . Смена знака аномалии индекса  $W$  в 2003 г. в совокупности со сменой знака аномалии индекса  $E$  в 2005 г. привела к увеличению площади Обь-Енисейской полыньи и смещению её границы к югу.

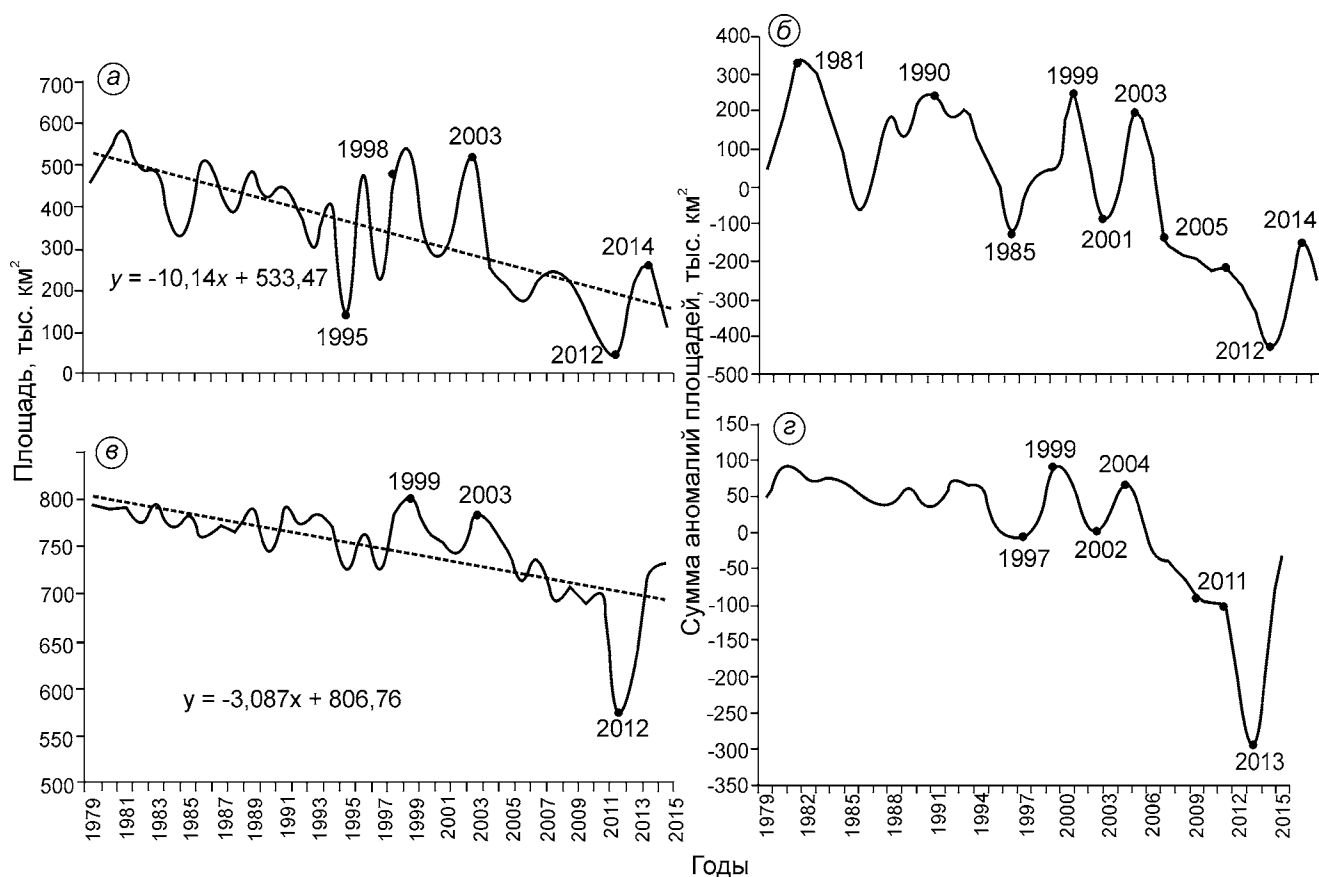
Миграция южной границы полыньи в Обской губе неразрывно связана с ледовым режимом всего моря. Рассмотрим эту связь. Существенное изменение макроциркуляционных процессов в атмосфере и развитие Обь-Енисейской полыньи вызвало соответствующие изменения ледового режима Карского моря. Как отмечалось ранее, при развитии макроциркуляционных процессов меридиональной формы  $E$  ледовитость Карского моря уменьшается. В изменениях во времени средней площади льда в Карском море в летний (рис. 4, *а*) и зимний (см. рис. 4, *в*) периоды отчётливо прослеживается отрицательный тренд. Минимальные значения площади льда как летом, так и зимой в исследуемый период отмечены в 2012 г. Зимой минимальное значение площади льда в 2012 г. наблюдалось в феврале, а летом в сентябре. В последующие годы отмечается некоторый рост площади льда.

Как видно на рис. 4, *б*, *г*, с 2003 г. летом и с 2004 г. зимой произошло значительное нарастание отрицательных аномалий площади льда, которое продолжилось до 2012 и 2013 гг. Затем, к 2014 г., доля положительных аномалий увеличилась почти до уровня 2001 г. В последние два года отмечено нарастание отрицательных аномалий.

В заключение опишем изменения интегральной кривой аномалий температуры воздуха на о. Белый (сама кривая не приводится). С 1997 г. до холодного сезона 2005/06 г. интегральная сумма аномалий падала, т.е. преобладали отрицательные аномалии температуры. После 2006 г. начался рост интегральных сумм, который заметно усилился после сезона 2009/10 г. Ранее было показано, что знак аномалии на интегральной кривой площади Обь-Енисейской заприпайной полыньи сменился в ледовый сезон 2003/04 г. В этот же сезон изменился знак аномалий ряда медианных значений широты южной границы полыньи, а для ряда средних значений широты смена знака аномалии зафиксирована в сезон 2004/05 г. Таким образом, мы видим, что изменения температуры зависят от предшествующих изменений площади Обь-Енисейской полыньи и положения южной границы полыньи. Точка смены знака аномалий площади Обь-Енисейской полыньи предвещает на два года аналогичную точку смены знака аномалий температуры. Подтверждается известный тезис, что сильно развитая полынья оказывает отепляющее влияние на близлежащие районы.

## Выводы

В результате анализа взаимосвязи расположения кромки полыньи в Обской губе в 1997–2016 гг., а также местных гидрометеорологических условий и крупномасштабной изменчивости циркуляции атмосферы (через индексы Вангенгейма–Гирса, АО и САК) установлено, что южное положение границы полыньи осенью предполагает более тёплые зимние месяцы. Граница полыньи в каждую последующую декаду почти однозначно определялась её положением в предшествующий период. Данная зависимость значительно усиливается в весенний период: начиная со второй декады апреля коэффициент корреляции находится в пределах 0,82–0,97.



**Рис. 4.** Изменение во времени средних значений площади морского льда в Карском море: *a* – в летний период (июнь–октябрь); *в* – в зимний период (ноябрь–май) и соответствующие им интегральные кривые: *б* – лето; *г* – зима

**Fig. 4.** Temporal variability of mean area of ice cover values in Kara Sea. *a* – summer (June–September); *в* – winter (November–May) and integral curves for these periods: *б* – summer; *г* – winter

Выявленные зависимости могут быть использованы для прогнозирования положения кромки с заблаговременностью 5–8 декад, что чрезвычайно важно для планирования летней навигации. Выполненный прогноз определения границы полыньи в январе–феврале 2016 г. с использованием в качестве предикторов данные о температуре и широте положения кромки в предшествующий период показал хорошие результаты: разница между прогнозом и фактическими данными составила  $0,01 \div -0,43^\circ$  широты при среднем значении за шесть декад  $0,11^\circ$  широты. Анализ связи рядов значений широты в конкретные декады и индексов циркуляции атмосферы (как синхронно, так и со сдвигом 1–2 года) показал, что наибольшая связь прослеживается с индексами АО (индекс опережает на год, в семи случаях  $r > 0,7$ ; в среднем  $r = 0,77$ ), САК (индекс опережает на год, в шести случаях

$r > 0,7$ ; в среднем  $r = 0,73$ ) и Вангенгейма–Гирса *E* в мае ( $r = -0,71$ ).

При исследовании долгопериодных крупномасштабных изменений климатических параметров использован метод построения интегральных кривых аномалий. На интегральной кривой ряда аномалий средних значений широты южной границы полыньи получена значимая точка перегиба в ледовый сезон 2004/05 г. До этой даты аномалии широты положения кромки имели положительный знак, после зимы 2006/07 г. падение интегральной кривой резко усилилось. Как было показано, при этом изменились период и амплитуда колебаний, что может указывать на перестройку системы циркуляции в исследуемом районе. Получено подтверждение известного тезиса, что сильно развитая полынья при южном положении её границы оказывает тепляющее влияние на близлежащие районы.

## Литература

1. *Налимов Ю.В., Усанкина Г.Е., Голованова С.В., Кубышкин Н.В., Нестеров А.В.* Ледовый режим и особенности формирования заприпайной полыньи в северной части Обской губы // Тр. ААНИИ. 2009. Т. 450. С. 153–165.
2. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Ч. III. Служба морских гидрологических прогнозов (Руководящий документ 52.27.759–2011). М.: ТРИАДА ЛТД, 2011. 81 с.
3. *Гирс А.А.* Основы долгосрочных прогнозов погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 560 с.
4. *Гирс А.А.* Роль атмосферной циркуляции в формировании теплового режима Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 1967. Вып. 25. С. 5–22.
5. *Гирс А.А.* Учет развития макросиноптических процессов при изучении причин изменения фоновых характеристик гидросферы // Исследования по проблеме океан–атмосфера: Тр. Ленинградского гидрометеорол. ин-та. 1970. Вып. 32. С. 145–168.
6. *Виноградов Н.Д.* Связь между формами атмосферной циркуляции и температурой поверхности вод в северной части Атлантического океана // Проблемы Арктики и Антарктики. 1967. Вып. 25. С. 44–53.

## References

1. *Nalimov Y.V., Usankina G.E., Golovanova S.V., Kubishkin N.V., Nesterov A.V.* Ice conditions and special features of polynya formation in northern part of Ob Bay. *Trudy Arkticheskogo i Fntarkticheskogo nauchnoy-issledovatel'skogo institute. Proc. of AARI.* 2009, 450: 153–165. [In Russian].
2. *Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3 Chast' III (Rukovodyashchiy document 52.27.759– 2011).* Instruction on forecasts. Chapter 3. Part III. Service of Marine Hydrological Forecasts (Instruction paper 52.27.759– 2011). Moscow: TRIADA LTD, 2011: 81 p. [In Russian].
3. *Girs A.A. Osnovy dolgosrochnykh prognozov pogody.* Fundamentals of long-term weather forecast. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1960: 560 p. [In Russian].
4. *Girs A.A.* The role of atmosphere circulation in the formation of Arctic heat budget. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Problems, 1967, 25: 5–22. [In Russian].
5. *Girs A.A.* Consideration of macrosynoptic processes in investigation of background dynamic of hydrosphere. *Trudy Leningradskogo gidrometeorologicheskogo institute. Proc. of the Leningrad Hydrometeorological Institute.* 1970, 32: 145–168. [In Russian].
6. *Vinogradov N.D.* Interconnection between atmosphere circulation and sea surface temperature in northern part of Atlantic Ocean // *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Problems, 1967, 25: 44–53. [In Russian].