

Рис. 3. Площадь, занятая морским льдом в сентябре (1), и летняя температура воздуха (2) на акватории Северного Ледовитого океана (а) и морей Северного морского пути (б) в 1980–2023 годах

Сумма градусо-дней мороза (СГДМ), влияющая на разрастание ледяного покрова в холодную часть года с октября по апрель и на последующее летнее таяние, в 2023 году продолжала расти после 2020 года (рис. 4).

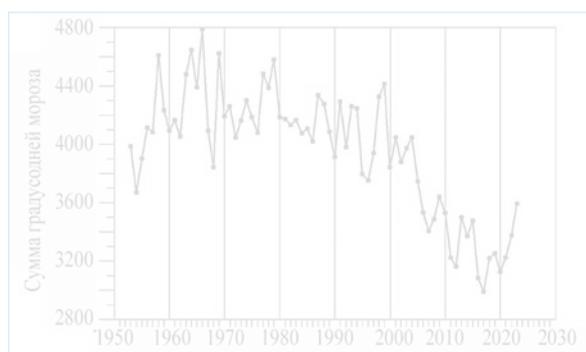


Рис. 4. Сумма градусо-дней мороза по данным 24 метеостанций на акватории СМП

Расхождение между аномальными за весь период инструментальных наблюдений значениями глобальной средней температуры воздуха и отсутствием подобных аномалий в Арктике привлекает внимание. Объяснение этого климатического парадокса связано с ведущей ролью низких широт в колебаниях климата Арктики, запаздывающих на 2–3 года относительно низкоширотных аномалий, что было установлено нашими исследованиями (см.: Alekseev G.V. et al. Influence of SST in low latitudes on the Arctic warming and sea ice // J. Mar. Sci. Eng. 2021; Vol. 9(10). P. 145; Алексеев Г.В. и др. Влияние аномалий температуры воды в низких широтах океана на колебания климата Арктики и их предсказуемость // Арктика: экология и экономика. 2019; Vol. 3(35). С. 73–83).

Аномалия 2023 года зародилась в низких широтах океана в Западном полушарии. Подтверждение этого

можно увидеть на рис. 5, показывающем сходство между развитием в 2023 году глобальной аномалии температуры воздуха и аномалий температуры поверхности океана в двух регионах.

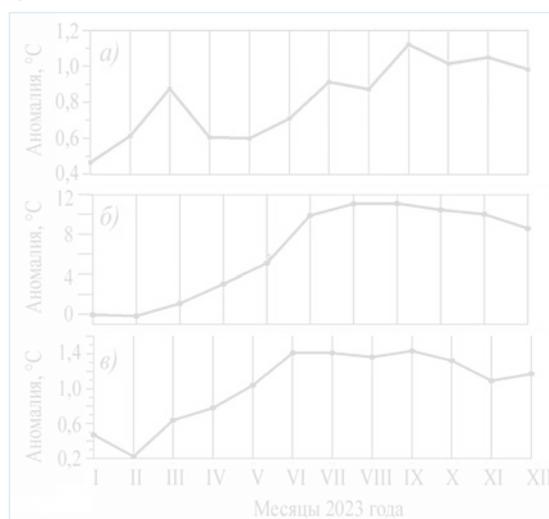


Рис. 5. Аномалии 2023 года среднемесячной глобальной температуры воздуха (а) и температуры поверхности океана в двух районах низких широт, отображаемых индексами whwp (10 ю. ш.–30° с. ш., 0–120° з. д.) (б) и tna (5,5–23° с. ш., 15–57° з. д.) (в). <https://psl.noaa.gov/data/climateindices/>

Согласно нашим оценкам запаздываний между аномалиями температуры поверхности океана в низких широтах Северной Атлантики и аномалиями температуры воздуха и ледовитости, проявление глобальной аномалии 2023 года в Арктике можно ожидать в 2025–2026 годах.

Г.В. Алексеев, Н.Е. Иванов, Н.Е. Харланенкова, Н.И. Глок, В.М. Смоляницкий (АНИИ)

## ФОРМИРОВАНИЕ ПЛОТНЫХ ШЕЛЬФОВЫХ ВОД, РАЗНОМАСШТАБНАЯ 3D ДИНАМИКА И ЭФФЕКТИВНОСТЬ КАСКАДИНГА В ОБЛАСТИ ШЕЛЬФ — СКЛОН В СОВРЕМЕННОЙ АНТАРКТИКЕ

Работы по проекту РФ 22-27-00013 «Формирование плотных шельфовых вод, разномасштабная 3D динамика и эффективность каскадинга в области шельф — склон в современной Антарктике» проводились с целью анализа изменчивости влияния каскадинга на циркуляцию вод в приконтинентальной области и на возмозможную эффективность формирования донных вод в зависимости от изменчивости внешних потоков соли (плавучести) в полыньях раз-

личного типа в шельфовых областях антарктических морей на основе моделирования динамики и трансформации вод на антарктическом шельфе и континентальном склоне в развитии от мелкого масштаба до мезомасштаба.

В настоящей статье представлены результаты исследований по программе проекта в 2022–2023 годах.

Исследование разномасштабной склоновой динамики плотностных потоков на шельфе и склоне необхо-

димо при анализе достоверности оценок интенсивности вентиляции глубинных вод и объемов формирования антарктических донных вод. Такие оценки, в свою очередь, необходимы для верификации крупномасштабных и климатических моделей. Полученные результаты исследования гидрофизических процессов в области шельф — склон с применением негидростатических численных моделей с заданием потоков плавучести, полученных на основе реального атмосферного форсинга, открывают новые возможности для понимания непрерывного развития этих процессов (придонных плотностных течений, вихрей, струй и т. д.) на шельфе и склоне от мелкомасштабных до мезомасштабных (и даже региональных). Это, вероятно, первая подобная попытка моделирования реального каскадинга на шельфе и склоне в Антарктике. Представляются важными оценки масштабов термохалинных и плотностных структур, скоростей плотностных потоков в развивающемся и развитом состоянии (особенно на склоне). Интересным является результат исследования изменчивости динамических процессов на шельфе и склоне в зависимости от изменчивости реальных потоков плавучести на поверхности океана, как в общей постановке, так и в конкретных случаях. Соединение возможностей современного моделирования, особенно в полной негидростатической постановке, в мелкомасштабном и мезомасштабном плане в сочетании с анализом уникальных данных мелкомасштабных — мезомасштабных натуральных наблюдений (в плане верификации численных экспериментов) является качественно новым шагом в исследовании процессов в области шельф — склон.

На рис. 1 показаны процессы, отвечающие за формирование плотных антарктических шельфовых вод (АШВ) при интенсивной инъекции солей в воду (внешний поток плавучести) в результате внутриводного — динамического ледообразования в полынье с открытой водной поверхностью (один из типов существования заприпайных и прибрежных полыней) при достижении соленостной конвекции дна.

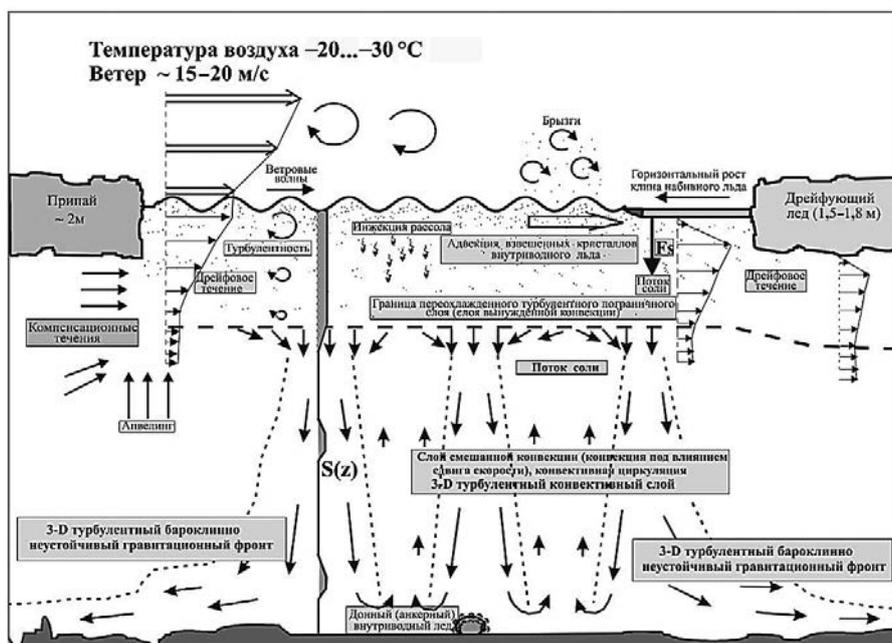
На основе анализа уникальных натуральных измерений на субмезомасштабном (и мелкомасштабном) гидрологическом полигоне исследована 3D мелкомасштабная

термохалинная и плотностная структура вод в области шельф — склон в море Содружества в Антарктике. Подтвержден летний сток — каскадинг АШВ по склону в виде дискретных меандров, образующихся в результате бароклинической неустойчивости фронта АШВ на шельфе. Полученные ранее оценки вдоль фронтального масштаба неустойчивости совпадают с наблюдаемой пространственной дискретностью каскадинга. Одновременно на шельфе наблюдается подчинение распространения АШВ субмезомасштабным особенностям топографии дна. Результатом каскадинга АШВ при взаимодействии с теплыми циркулярными глубинными водами (ЦГВ) является формирование антарктического склонового фронта (АСФ). На склоне каскадинг АШВ сопровождается компенсационным апвеллингом ЦГВ. В зависимости от батиметрической структуры склона наблюдаются различные режимы каскадинга. Мелкомасштабные неровности дна частично или полностью захватывают и направляют плотностные течения вниз по склону. Соотношение размеров неровностей дна и масштабов течения определяют режим стока.

Для корректного исследования мелкомасштабной динамики и трансформации вод на антарктическом шельфе и континентальном склоне в мезомасштабном развитии впервые используется модель Fluidity-ICOM в полной негидростатической постановке. Возможность решения задач с высоким порядком точности в модели определяется применением 3D адаптивной неструктурированной сетки с автоматическим измельчением до заданных масштабов. Проведенная модернизация вывода результатов расчетов позволила: достоверно визуализировать развитие гидрофизических процессов; получить численные оценки параметров этих процессов; выполнить корректную верификацию результатов численных экспериментов на основе уникальных данных натуральных наблюдений.

В области шельф — склон поставлен оригинальный 3D численный эксперимент, в котором на открытой водной поверхности встроенной полыньи задается рассчитанный поток соли (плавучести), обусловленный внутриводным ледообразованием в полынье. Моделируется очередное вскрытие полыньи при фактических

Рис. 1. Схема циркуляций в зимней заприпайной полынье с открытой водной поверхностью



параметрах атмосферного форсинга. Корректно воспроизводится конвекция осолонения как интенсивный локальный процесс образования АШВ и развитие придонных плотностных течений на шельфе и склоне в виде неустойчивых меандров-вихрей, которые наблюдаются и в натуральных условиях. Верификация результатов вычислений показала близкое, а иногда полное совпадение модельных геометрических, динамических, гидрофизических характеристик каскадинга с фактическими.

В Антарктике в зимний период формируются естественные условия, когда температура подледного слоя воды на шельфах близка к температуре замерзания при данной солености. В связи с этим существует понятие зимней — чисто соленостной конвекции, обусловленной исклю-

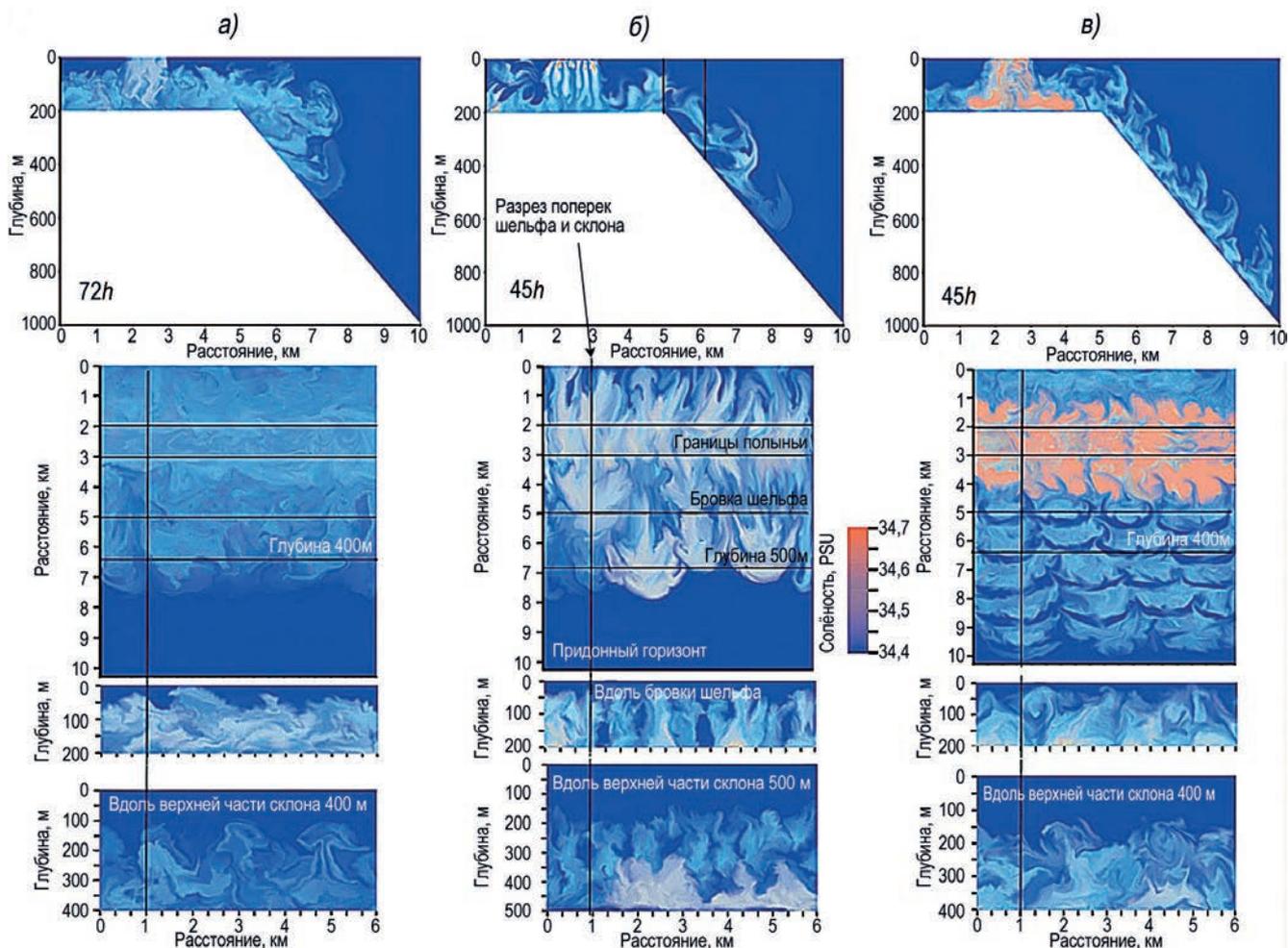


Рис. 2. Результаты численных экспериментов по исследованию изменчивости структуры и интенсивности плотностных течений в области шельф — склон в Антарктике для различных условий. Распределение солёности на склоне, в придонном горизонте и на разрезах поперек склона (на бровке шельфа и на склоне) для полыньи, покрытой молодым льдом — расчетное время 72 ч (а); с открытой водной поверхностью — расчетное время 45 ч (б); с открытой водной поверхностью, поддерживаемой экстремальным отжимным катабатическим ветром — расчетное время 45 ч (в)

чительно потоком солей в воду либо при статическом ледообразовании на нижней поверхности льда в полынье, покрытой молодым льдом, либо при внутриводном — динамическом ледообразовании в приповерхностном турбулентном слое в полынье с открытой водной поверхностью. На основе многолетнего массива данных космических наблюдений за ледяным покровом в районе полыньи в море Содружества и данных атмосферного реанализа ERA5 выполнен анализ геофизического диапазона метеоусловий вскрытия и существования прибрежных и прибарьерных полыньи в Антарктике в зимний период. На основе этих данных в рамках проекта были выполнены расчеты ледопродуктивности и соответствующих потоков солей в области полыньи.

На основе полученных оценок потоков соли в полынях различного типа были выполнены три оригинальных 3D численных эксперимента со встроеной полыньей (рис. 2): покрытой молодым льдом; с открытой водной поверхностью; с открытой водной поверхностью, поддерживаемой экстремальным отжимным катабатическим ветром. С увеличением интенсивности формирования АШВ в полынях выявлены три режима стока АШВ по склону: не волновой — или докритический; вихревой и волновой — или сверхкритические. Оценки скоростей стока АШВ на склоне являются правдоподобными. При всех режимах стока АШВ пространственные масшта-

бы меандров, вихрей или фронтальных волн оказались близкими. Оценки горизонтальных перепадов плотности на границе этих течений на склоне совпадают с подобными на границе АСФ.

Полученные численные оценки объемного и удельного потоков АШВ на материковом склоне вблизи прибрежной полыньи Дарнли в море Содружества позволяют уточнить вклад каскадинга в образование донных вод при различных режимах стока. Точность оценок существенно зависит от пространственного шага вычислений. Исследование показало, что увеличение минимального пространственного шага вычислений в 4 раза приводит к недооценке потоков ~ 30 %. Таким образом, корректными и наиболее точными оценками потоков на материковых склонах могут быть только те, которые получены при постановке численных экспериментов с использованием мелкомасштабных негидростатических моделей.

На основе полученных результатов были напечатаны 3 статьи в журналах «Метеорология и гидрология» и «Фундаментальная и прикладная гидрофизика» и сделаны доклады на 4 конференциях.

*П.Н. Головин, С.В. Кашин, М.С. Молчанов, И.А. Чистяков (АНИИ)*