Мировой океан и климат Земли

Л.Г. Маняхина, к.г.н., НИА-Природа

Потепление климата может выйти из-под нашего контроля прежде, чем мы осознаем последствия этого, утверждают ученые, изучающие Мировой океан.

Доклады Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) обеспечивают детальный и авторитетный анализ того, что мы действительно знаем относительно продолжающегося изменения климата и в чем еще остается неопределенность. Большинство научного сообщества согласно с мнением, что антропогенное изменение климата уже имеет место, однако есть существенная неопределенность в оценке чувствительности климатической системы и воздействия человечества на Землю. Можно полностью признать, что глобальное потепление за счет парниковых газов частично скрыто [1].

В течение последних нескольких десятилетий среди ученых и политиков продолжаются споры о причинах изменения климата. На коротких временных шкалах, ограничиваясь данными прямых инструментальных измерений, в большинстве работ внешнее воздействие на климат связывают с откликом системы «океан – атмосфера» на эти процессы. Весь механизм атмосферной циркуляции, а следовательно и формирования земного климата, самым тесным образом связан с Мировым океаном. Колебания теплозапасов в любом из пяти океанов Земли, изменения интенсивности океанских течений, размеров площади морских льдов – все это неизбежно влечет за собой крупномасштабные изменения погоды или изменения в тех или иных географических регионах. В связи с этим изучение взаимодействия океана и атмосферы – одна из самых важных задач современной метеорологии.

Конференция в Боулдере (США, 1964 г.) подвела итоги работ ученых по общей циркуляции атмосферы и долгосрочному прогнозу погоды [2]. Согласно исследованиям фундаментальная роль океана выражается в том, что он формирует:

- радиационный климат атмосферы через испарение вод и выбросы ядер конденсации (соли), поля облачности (альбедо);
- амплитуду годового хода (через его «тепловую память»);
- локальный климат в отдельных районах через теплые течения.

На международной конференции по изменению климата, состоявшейся в Женеве в 1990 г., было высказано предположение о ведущей роли океана в долгосрочном прогнозе погоды. Эта гипотеза нашла важное подтверждение в ряде работ океанологов, открывших эффект формирования аномальных температурных возмущений в толще вод океана.

Рассмотрим роль океана в формировании климата земли, проанализировав исследования, проведенные учеными в разных зонах океана, а также результаты Всемирной конференции по

изменению климата, проходившей в Москве с 29 сентября по 3 октября 2003 г.

В последние десятилетия был проведен ряд исследований, результаты которых позволяют сделать вывод, что в Мировом океане идет процесс потепления глубинных вод. Так, о тенденции потепления, проявившейся в прошедшее столетие, свидетельствует база данных, включающая 5 млн. температурных профилей [3]. Новая модель, охватывающая глубины 0–3000 м (в отличие от старых, в основном оперировавших с глубинами 0–300 м), показывает, что за последние 50 лет постоянных замеров наблюдается медленное повышение средней температуры воды Мирового океана. Средние значения температур за весь период наблюдений свидетельствуют об их постепенном росте, составляющем 0,47° за столетие.

Аномалии, наблюдающиеся в настоящее время проявляются в изменении температуры, солености воды океана, темературы воздуха, глобальной океанической циркуляции вод, площади арктических льдов.

Температура воды Северной Атлантики и воздуха над ней, а также соленость поверхностных вод выше средних показателей для Мирового океана соответственно на 5°С, 9°С и 1‰. Северная же часть Тихого океана, наоборот, отличается отрицательной аномалией солености (–0,5‰) [4].

Оба океана имеют в средних широтах Северного полушария одинаковую протяженность по широте, но средняя температура всей толщи вод Атлантики теплее на 0,3°С. Контраст становится еще более ярким, если рассмотреть отдельно верхний теплый и глубинный холодный слои этих океанов: средняя температура поверхностных вод Северной Атлантики (16°С) на 6°С ниже температуры верхнего слоя северной части Тихого (22°С), в то же время температура глубинных слоев Северной Атлантики значительно выше, чем в северной части Тихого океана.

Таким образом, в целом теплая и соленая Северная Атлантика на поверхности холоднее, а в глубинных слоях теплее в среднем холодной и пресной северной части Тихого океана. Эта аномалия связана с существенным преобладанием испарения над осадками, разница между которыми составляет в Северной Атлантике 24 тыс. км^3/год [4].

Следует отметить, что тепловое расширение морской воды, порядка 10%, оказывает влияние на связь водного баланса с развивающимся потеплением. На фоне последнего происходит постепенное нарастание отрицательного водного баланса практически всех районов оледенения. В целом общее сокращение оледенения в настоящее время достигает более 400 км^3/год. С развитием потепления и активизацией таяния ледников все больше воды попадает в Мировой океан. Сейчас приращение его объема составляет около 610 км^3/год, что вызывает и постепенное повышение уровня.

Уникальные данные о прошлом климате Земли получены в результате бурения Антарктического ледяного щита на российской станции Восток. Ледяной керн длиной 3523 м позволил восстановить историю климата Антарктиды на протяжении 400 тыс. лет, когда периоды потепления сменялись периодом похолоданий и эти колебания сопровождались изменениями содержания парниковых газов в атмосфере [5]. При этом оказалось, что современное повышение содержания парниковых газов в атмосфере не имеет аналогов на протяжении последних 400 лет.

Полученные результаты свидетельствуют о сложной природе современных изменений климата в полярных областях, которые не могут быть объяснены одним антропогенным воздействием и нуждаются в дальнейших исследованиях.

Сильное потепление Арктики, начавшееся в начале 20-х гг. XX в. и продолжавшееся в течение почти двух десятилетий, является одним из самых примечательных климатических событий. В течение пика потепления, с 1930 по 1940 гг., аномалия среднегодовой температуры для региона 60–90°с.ш. возросла примерно на 1,7°С [6]. Анализ климатических аномалий, проведенный совместно учеными Германии, Великобритании, России и Норвегии, показал, что увеличение температуры в Арктике было вызвано усилившимся океаническим втоком в Баренцево море, порождаемым ветрами, с сопутствующим ему отступлением морского льда. Величина втока связана с интенсивностью западных ветров в Баренцевом море. Можно также предположить наличие положительной обратной связи, поддерживающей усиление западных ветров за счет циклонической атмосферной циркуляции в регионе Баренцева моря, которая вызывается сильным потоком тепла с поверхности над свободными ото льда областями. В период потепления в Арктике в начале XX в., по данным наблюдений, прослеживается ряд подобных событий, включая усиление западных ветров между Шпицбергеном и самой северной частью побережья Норвегии, уменьшение площади морского льда и усиление циклонической циркуляции над Баренцевым морем. Интересно отметить, что усиление западного потока в высоких широтах в этот период не было связано с Северо-Атлантическим колебанием (NAO), которое в этот период ослабло.

Баренцево море считается одним из самых штормовых в мире. По его акватории проходит граница очень контрастных воздушных масс, проникающих сюда из Западной Атлантики – теплых и влажных, а также из Центральной Арктики – очень холодных и относительно сухих. Это делает все атмосферные фронты над Баренцевым морем очень активными, циклоническую деятельность – весьма интенсивной, с глубокими циклонами и большими градиентами давления, порождающими сильные ветры и волнение (высотой более 3,5 м).

Вместе с тем важные открытия получены в результате проведения советско-американской экспедиции в море Лаптевых Северного Ледо-

витого океана. В ходе экспедиции ученые из научно-исследовательского института Арктики и Антарктики вместе с коллегами из США и Канады сделали ряд открытий, позволяющих по-новому оценить прежние данные об этом районе арктического бассейна и его влиянии на климат планеты.

Выяснилось, что в высокоширотной части моря Лаптевых существуют мощные глубинные течения со скоростью до 10 см в секунду, способные перемещать огромные массы холодной воды, существенно влияющие на процесс льдообразования.

Акустическая термометрия и исследования температуры, основанные на традиционных методиках, показывают, что слой атлантических вод в Северном Ледовитом океане (200–700 м) прогревался примерно на 0,2°С к началу 90-х гг. [7].

Изменчивость температуры в Арктике в XX в. сопровождалась большими изменениями в распространении морского льда. За последние 25 лет его площадь в Арктике уменьшилась на 0,7 млн. км^2.

Известно, что межгодовые изменения ледовитости полярных морей значительно меняют потоки энергии и влаги в атмосферу и, следовательно, вызывают ее крупномасштабную реакцию. Изменение площади полярных льдов существенно влияет на температуру воздуха в Арктике, и это отчетливо проявляется при анализе относительного повышения среднегодовой температуры нижнего слоя атмосферы.

Так, на островах и побережьях арктических морей России практически повсеместно повышалась средняя температура воздуха в весенней период 1961–2001 гг. [8]. Особенно заметно это потепление в бассейне Карского моря, где температура возросла за 40 лет на 1,5–3,6°С. Наблюдается интенсивное потепление в весенний период на Таймыре (о.Диксон, о.Русский, м.Челюскин). Значительное потепление отмечается и в южных районах (г.Тарко-Сале, г.Салехард). К востоку тенденция повышения температуры ослабевает и в некоторых районах меняется на обратную (г.Черский). Это же явление отмечается и на некоторых станциях западной Чукотки (г.Амбарчик, г.Певек).

При анализе данных за отдельные годы хорошо заметно, что климат западной и восточной Арктики существенно различался. Так, в конце 60-х гг. в западном секторе были аномально холодные годы, в восточном – наоборот, теплые. Причина таких колебаний температуры видится в изменениях глобальной циркуляции атмосферы. Если же проанализировать весь массив данных с начала наблюдений, то четко прослеживается интенсивное потепление в 1940-х гг. Это подтверждает наличие цикличности климатических изменений [8].

Принимая во внимание также меридианный перенос тепла и результаты, полученные спутниковыми методами, установлено, что тепло в океане переносится с не меньшей интенсивностью, чем в атмосфере, а значит, нельзя игнорировать роль водной оболочки Земли при формировании климата. В связи с изменением в современной глобальной океанической циркуляции можно предположить, что теплообмен между поверхностными и глубинными водами в будущем может серьезно ускориться [4].

При таком подходе возникает вопрос: какой механизм на Земле управляет перераспределением тепла, а значит, и изменчивостью климата?

Отметим, что плотность воды в 800 раз больше плотности воздуха, а удельная теплоемкость – в 4 раза. Легко подсчитать, что теплозапас всего лишь 3-метрового слоя океана равен теплоемкости всей атмосферы. Относительно малые теплозапасы атмосферы обуславливают и меньшую ее способность сохранять неизменным состояние, т.е. большую изменчивость во времени ее основных характеристик или, другими словами, большую нестабильность. Инерция в развитии процессов в водах океана в десятки раз большая, чем в воздухе атмосферы. Соответственно и влияние атмосферы на состояние воды в океанах менее устойчиво и менее значительно, чем влияние океана на состояние атмосферы. Реальное значение имеют изменения температуры воды на поверхности океана на десятые доли градуса.

Приведенные выше аномалии океана однозначно приводят к выводу о существовании межокеанского обмена свойствами [4]. С Северной Атлантики, по мнению А.Сокова, и начинается единый глобальный процесс межокеанской циркуляции вод, который связывает воедино положительные аномалии содержания тепла и соли в этом регионе и отрицательные – в северной части Тихого океана.

Итак, межокеанский обмен свойствами может являться движущим механизмом колебаний климата.

В поверхностных слоях идет поток тепла и пресной воды из Тихого и Индийского океанов в Атлантический, а в глубинах – поток соленых вод из Атлантического океана в Индийский и Тихий. Первые работы, связанные с разработкой идеи межокеанского обмена свойствами или глобального океанского конвейера, исходили из принципа двуслойной циркуляции вод Мирового океана. В ходе последних исследований было установлено, что при изучении глобального межокеанского конвейера необходимо учитывать его взаимодействие с локальной многослойной циркуляцией Северной Атлантики. По мнению А.Сокова, именно это взаимодействие приводит к смене режимов глобальной циркуляции (ее изменчивости), а значит и к колебаниям климата Земли.

На основе балансовой гидродинамической модели меридианного переноса тепла (МПТ) в океане получены новые оценки его межгодовых аномалий в Северной Атлантике за период 1950–2002 гг. Корреляционный и спектральный анализ рядов среднемесячных аномалий МПТ и изменчивости индекса Южного Колебания (ИЮК) выявил закономерности вариации МПТ в Северной Атлантике и их связь с наиболее значимы-

ми событиями Эль-Ниньо за исследуемый период [9].

Установлено, что главный максимум спектральной плотности колебаний МПТ, так же как и ИЮК, приходится на период 3,5–4 года. Характерно, что события, по своей природе аналогичные Эль-Ниньо в Тихом океане, происходят в Атлантике на 12–18 месяцев позже, когда вследствие ослабления пассатов теплые воды из региона Мексиканского залива движутся на юго-восток в виде экваториальной волны Кельвина, обуславливая интегральное уменьшение МПТ к северу. В общем случае возникают длительные (до 8–12 месяцев) отрицательные аномалии теплосодержания вод Северной Атлантики в умеренных широтах, что в свою очередь определяет погодные аномалии на северо-востоке США, Канады и в странах Европы.

Как известно, в высоких широтах Северной Атлантики происходит процесс опускания ко дну охлажденных вод и дальнейшее распространение их в глубинных слоях по всему Мировому океану. На смену им, по поверхности, в Северную Атлантику приходят теплые воды из низких широт (например течение Гольфстрим). Таким образом формируется современная межокеанская конвейерная лента, система океанических течений.

Проанализировав характерные метеорологические ситуации и динамику центров действия атмосферы над акваторией Северной Атлантики в периоды возникновения наиболее значимых отрицательных аномалий МПТ, Л.В.Нечволодов сделал вывод, что все случаи проявления аномально низкого МПТ «привязаны» к типовому общему сценарию развития атмосферной циркуляции над исследуемой областью. На основе проведенных исследований предлагаются общие рекомендации по совершенствованию методов долгосрочного прогноза погоды и климата Северо-Атлантического региона [9].

В сентябре-октябре 1993 г. на научно-исследовательском судне «Профессор Мультановский» был выполнен океанографический разрез по 36°с.ш. в Атлантике. Анализ результатов рейса выявил удивительные факты [4]:

наблюдаются климатически значимые охлаждение и распреснение глубинных слоев Северной Атлантики на протяжении последних 30 лет;

тенденция изменчивости промежуточных вод на разрезе за тот же период времени меняла знак: они теплели в 60–70-х гг. и затем резко охлаждались и распреснялись в 80–90-е гг.;

наблюдаемые климатические изменения в Северной Атлантике связаны с холодными водами. В начале 1990-х гг. обнаружена интенсификация распространения на юг вод моря Лабрадор и на север – антарктических промежуточных и глубинных вод;

в отличие от общепринятых схем циркуляции вод Северной Атлантики, обнаружено, что наиболее молодые (охлажденные и распресненные) лабрадорские воды распространяются на юг не вдоль материкового поднятия Северной Америки, а вдоль западного склона Срединно-Атлантического хребта.

Охлаждение и распреснение вод Северной Атлантики зафиксировано также в субполярных областях в 1991 г. и на 48°с.ш. в 1992 г. Результаты исследований показывают, что охлаждение Атлантики к концу 1993 г. распространилось до субтропических широт.

Это уже второе за последние десятилетия значительное охлаждение и распреснение, зафиксированное в Северной Атлантике после Великой соленостной аномалии (ВСА) 1970-х гг. Однако если ВСА была характерна для верхнего 1000-метрового слоя, то охлаждение и распреснение начала 1990-х гг. коснулось промежуточных и, что очень важно, глубинных слоев.

Различие этих двух охлаждений вод Северной Атлантики дает нам ключ к пониманию механизма взаимодействия локальной многослойной циркуляции холодных вод Северной Атлантики и межокеанского конвейера, т.е. механизма воздействия океана на климат.

Рассмотрим роль окраинных морей. Располагаясь по границам океанов Земного шара, они вносят важный вклад в термохалинную циркуляцию океана через обмен водой с главными океаническими бассейнами. Как известно, некоторые промежуточные и все глубинные водные массы Мирового океана формируются в результате интенсивного обмена «воздух-океан» в окраинных морях. Средиземное море может рассматриваться как особый океанический бассейн, в котором сосредоточен широкий диапазон океанических процессов и взаимодействий глобальной значимости.

Среди множества процессов наиболее важными для общей циркуляции океана, и особенно для Северо-Атлантической циркуляции, являются [10]:

1) существование естественной изменчивости средиземноморской циркуляции на масштабах нескольких десятилетий и, как следствие, важность исследования возможности более сложного взаимодействия с Северо-Атлантическим океаном;

2) «климатическая» роль проливов, в особенности Гибралтарского, в термохалинной циркуляции;

3) влияние соленой промежуточной воды на интенсивность термохалинной океанической циркуляции.

Хорошо известно, что Средиземное море является океаническим бассейном, создающим сильную изменчивость в формировании и трансформации водных масс. Сицилийский пролив играет важную роль во взаимодействии восточной и западной частей Средиземного моря и, весьма вероятно, определяет инерционный отклик на распространение возмущений между двумя основными подбассейнами. Подобным образом Гибралтарский пролив можно рассматривать как «активный» проход, способный оказывать влияние на циркуляцию в Средиземноморском бассейне и в Северной Атлантике. Это возможно благодаря сложной геометрии и батиметрии пролива, которые

гидравлически регулируют количество и плавучесть атлантической воды, втекающей в Средиземноморский бассейн, и количество средиземноморской выносящейся воды, движущейся на запад в Атлантический океан, создавая язык теплой и соленой воды. Последний может быть прослежен по всей Северной Атлантике на глубине около 100 м. Гибралтарский пролив представляет собой ключевой объект при изучении изменения средиземноморского климата и климатической изменчивости Северной Атлантики в целом.

Выводы Всемирной конференции по изменению климата (2003 г.) показывают, что прогноз чувствительности и отклика столь важной регионально-сопряженной системы, как «атмосфера – океан», на увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере напоминает соответствующую потенциальную чувствительность и отклик термохалинной циркуляции в Северной Атлантике, однако это требует дальнейших всесторонних исследований.

Среди многочисленных предполагаемых проявлений глобального потепления климата в последнее время упоминается высвобождение значительной массы метана, сосредоточенной ныне в зоне вечной мерзлоты и океанических гидратах. Согласно недавно опубликованным оценкам [11], по этой причине в ближайшее десятилетие общий объем метана, выброшенный в атмосферу из зоны вечной мерзлоты над территорией России, может составлять не менее 100 млрд.м^3 (что соответствует массе около 70 Мт CH_4). Выброс в атмосферу столь значительной дополнительной массы может повлечь существенную трансформацию всего газового состава тропосферы (в том числе усиление образования тропосферного озона), в первую очередь вследствие усиления разрушения в реакции с метаном самого активного атмосферного радикала – гидроксила (OH^-).

Проведенные расчеты показывают, что при эмиссии большой массы метана в атмосферу ее газовый состав подвергается значительной фотохимической трансформации [12]. В частности, произойдет рост содержания в тропосфере окиси углерода и озона, а также существенное сокращение концентрации OH^-. Вследствие этого уменьшения заметно снизится способность атмосферы Земли к самоочищению. В результате возможного прорыва в атмосферу вышеуказанной массы метана произойдет также изменение содержания основных малых газов (NO, NO_2, CO, O_3, OH^- и др.). Амплитуды изменения содержания газов (за исключением самого метана) соизмеримы с прогнозами экспертов, посвященными оценкам экологической ситуации в течение XXI в. Относительно короткий (8–10 лет) период жизни метана позволяет надеяться на достаточно скорое возвращение газового состава атмосферы в «докатастрофное» состояние.

По данным, полученным в период международного геофизического года (1957/1958), средняя концентрация CO_2 в атмосферном воздухе равна $314{,}5 \times 10^{-6}$, а в отдельных регионах ее колебания составляют около 6×10^{-6} (шесть частей на миллион) [13]. Ежегодное увеличение концентрации углекислого газа в воздухе в начале 60-х гг. оценивалось в $0{,}72 \times 10^{-6}$, что составляет примерно половину его поступления в атмосферу от сгорания ископаемого топлива. Вторая половина поглащается растительными организмами в ходе процессов фотосинтеза, при этом более 5/6 поглощения происходит на поверхности Мирового океана и только 1/6 – на суше.

По мере роста CO_2 в атмосфере Мировой океан и поверхность континентов будет поглощать меньшую долю антропогенного CO_2. Как показывают результаты модельных расчетов, суммарный эффект с учетом карбонатного обмена между атмосферой, океаном и поверхностью континентов будет способствовать еще большему росту концентрации CO_2 в атмосфере.

При потеплении уменьшается растворимость углекислого газа в воде, что может привести к значительному выделению углекислого газа в атмосферу. Стоит напомнить, что сейчас углекислого газа в Мировом океане содержится примерно в 53 раза больше, чем в атмосфере. При повышении температуры воды коэффициент растворимости углекислого газа уменьшается, что приводит к выделению растворенного в океане углекислого газа в атмосферу. Каждое последующее удвоение концентрации углекислого газа дает повышение температуры примерно на 2,5°С [14].

При указанных значениях потепления содержание водяного пара в атмосфере тоже должно существенно увеличиться.

Часто рост содержания водяного пара в атмосфере в результате потепления связывают с ростом альбедо Земли вследствие возможного роста облачности. Однако современные исследования показывают, что рост облачности идет весьма медленно (площадь увеличивается примерно на 0,4% на каждый градус потепления, либо даже уменьшается) [15]. При этом также происходит перераспределение облачности по высоте и изменение ее оптической толщины. Важно, что возможное уменьшение оптической толщины облаков и рост их вертикальной протяженности, особенно в нижних широтах, заметно уменьшают отражение солнечного света облаками, но практически не снижают парниковый эффект.

Развивающееся потепление климата вызывает рост испарения с морской акватории, что приводит к увеличению облачности и атмосферных осадков на поверхности Земли. В то же время в процессе потепления уменьшается разность температур между низкими и высокими широтами с одновременным нарастанием контрастности температур между океаном и континентами. Это приводит к существенной перестройке циркуляционных процессов в атмосфере, определяющих поступление влаги на территорию суши: происходит усиление циклонических процессов и увеличение водности самих циклов.

Моря, характеризующиеся высоким испарением, являются областями интенсивного энергообмена с атмосферой. Северная Атлантика – глобальная энергоактивная область: занимая 11% поверхности Мирового океана, она отдает 19% всего тепла, поступающего на Землю. В целом на испарение вод океана и суши расходуется 9х1023 Дж в год, а ежегодная энергия солнца, поступающая к водам, составляет 10х1023 Дж [4].

Итак, рассматривая всего лишь некоторые результаты, полученные при исследовании морей и океанов, можно сказать, что в последние годы коренным образом изменились взгляды на роль океана в формировании климата, обнаружены значимые климатические изменения температурно-соленосных характеристик на абиссальных глубинах и колебания океанских потоков тепла в умереннных широтах. В результате к настоящему времени сложилось понимание важности термохалинной циркуляции Мирового океана как важнейшего звена перераспределения энергии и формирования долгопериодных колебаний климата.

Имеется много вопросов, на которые пока нет ответов. Но уже ясно, что естественные многолетние колебания теплового и динамического режимов Мирового океана и атмосферы весьма значительны и наверняка превосходят современные предполагаемые глобальные антропогенные изменения климата.

Океан является основой для существования нашей планеты и устойчивого развития человечества. Изучение океана во всей его толще и во всех регионах с использованием современных методов и средств математического моделирования позволит создать общемировую систему прогноза погоды, стихийных бедствий и изменений климата.

Литература

1. Болин Б. Климат и наука, знание и понимание, необходимые для действия в условиях неопределенности // Тез. докл. Всемир. конф. по изменению климата. Москва, 29 сент.–3 окт. 2003 г. / Ин-т глобального климата и экологии Росгидромета и РАН. – М., 2003. С.9–11.
2. Марчук Г.И. Роль океана в формировании климата // Тез. докл. Всемир. конф. по изменению климата. Москва, 29 сент.–3 окт. 2003 г. / Ин-т глобального климата и экологии Росгидромета и РАН. – М., 2003. С.16
3. Потепление Мирового океана в течение ушедшего века: http://www.nature.ru/db/
4. Соков А. Роль океана в колебаниях климата Земли // Море. 1998. № 2.
5. Анализ изменения климата за последние 400 тыс. лет: http://www.oceaninfo.ru/smi/
6. Бенгтсон Л., Семенов В.А., Йоханнсен О.М. Механизм потепления в Арктике в начале XX века // Тез. докл. Всемир. конф. по изменению климата. Москва, 29 сент.–3 окт. 2003 г. / Ин-т глобального климата и экологии Росгидромета и РАН. – М., 2003. С.378.
7. Семенов В.А., Бенгтсон Л. Отклик арктического климата на изменение морского льда: моделирование с помощью атмосферной GSM // Тез. докл. Всемир. конф. по изменению климата. Москва, 29 сент.-3 окт. 2003 г. / Ин-т глобального климата и экологии Росгидромета и РАН. – М., 2003. С.505
8. Шиловцева О.А., Романенко Ф.А. Изменение приземной температуры воздуха на островах и побережьях арктических морей России в XX веке // Тез. докл. Всемир. конф. по изменению климата. Москва, 29 сент.-3 окт. 2003 г. / Ин-т глобального климата и экологии Росгидромета и РАН. – М., 2003. С.438.
9. Нечволодов Л.В. Эль-Ниньо и вариации климата Северной Атлантики // Тез. докл. Всемир. конф. по изменению климата. Москва, 29 сент.-3 окт. 2003 г. / Ин-т глобального климата и экологии Росгидромета и РАН. – М., 2003. С.534.
10. Артале В. Последние достижения в моделировании средиземноморской циркуляции и ее влияния на климат // Тез. докл. Всемир. конф. по изменению климата. Москва, 29 сент.–3 окт. 2003 г. / Ин-т глобального климата и экологии Росгидромета и РАН. – М., 2003. С.200.
11. Yakushev V.S., Chuvilin E.M. Natural gas and gas hudrate accumulations within permafrost in Russia // Cold Regions Science and Technology. 2000. V.31, p.189–197.
12. Киселев А.А., Кароль И.Л., Малавский-Малевич С.П. Отклик газового состава атмосферы на возможный скачок выброса метана, обусловленный протаиванием в зоне вечной мерзлоты на территории России // Тез. докл. Всемир. конф. по изменению климата. Москва, 29 сент.–3 окт. 2003 г. / Ин-т глобального климата и экологии Росгидромета и РАН. – М., 2003. С.513.
13. Погода и Мировой океан: http://geofuck2k.chat.ru/html/okean.htm
14. Монин А.С., Шишков Ю.А. Климат как проблема физики // УФН. 2000. Т.170, №4.
15. Мелешко В.П., Катцов В.М. и др. Изучение возможных изменений климата с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана // Изменения климата и их последствия. – СПб.: Наука, 2002.

Очистка вод от загрязнения с помощью природного холода

Н.И. Осокин, А.В. Сосновский
Институт географии РАН

Растущий дефицит пресной воды и ухудшение ее качества вследствие техногенного загрязнения выливаются в острую экономическую и социальную проблему. Одним из путей ее решения является опреснение воды.

Однако применение промышленных способов опреснения требует больших капитальных и энергетических затрат, а способы опреснения, основанные на применении возобновляемых видов природной энергии, таких как солнечная радиация, ветер, природный холод, дают небольшую производительность в силу рассредоточенности такой энергии в пространстве и трудностей ее концентрации.

В последние годы были проведены исследования по рациональному использованию запаса холода приземного слоя атмосферы для увеличения интенсивности льдообразования. Результатом этих исследований явилась разработка метода факельного льдообразования, заключающегося в применении дальнеструйных дождевальных установок для разбрызгивания воды в морозном воздухе, создания капельного факела многометровой высоты и получения пористого льда. Причем в зависимости от технологии намораживания можно получать лед разной структуры и плотности.

Отличие метода факельного льдообразования от методов намораживания льда тонкослойным наливом состоит в переносе основного теплообмена с плоскости намораживания в объем капельного факела. Это позволяет значительно увеличить поверхность тепло- и массообмена и на порядок увеличить интенсивность намораживания. Так, если метод тонкослойного налива дает за сутки слой льда толщиной 20 см при 20°С и скорости ветра около 4 м/с, то факельное намораживание за сутки позволяет создавать массив пористого льда средней толщиной 4 м (максимальной – до 7 м) при плотности льда 500–600 кг/м^3.

Производительность намораживания ледяного материала, его структура и свойства зависят от параметров капельного факела, основными из которых являются высота факела и размер капель, от метеорологических условий и технологии намораживания. При полном замерзании капель на намораживаемой поверхности образуется сухой гранулированный лед, состоящий из ледяных сфер диаметром 1–2 мм. При частичном замерзании капель воды, до 55–60% ее объема, они покрываются ледяной коркой толщиной до 0,2–0,3 мм, которая при падении разбивается и освобождает заключенную в них воду. В результате на намораживаемой поверхности формируется слой водо-ледяной смеси, состоящий из обломков ледяных скорлупок и воды. При непрерывном дождевании ледяная масса не растекается и быстро растет в высоту с интенсивностью 4–10 м/сут. При этом избыток воды легко фильтруется через массив пористого льда и вытекает из зоны намораживания. После окончания дождевания влажность пористого льда через несколько часов составляет 10-12%.

Плотность пористого льда изменяется от 400 кг/м^3 в верхней части массива до 600 кг/м^3 на глубине более 2–3 м. Через 2–3 сут влажность пористого льда понижается до 5–6%. При этом лед состоит из ледяных зерен, образовавшихся из осколков ледяных скорлупок капель в результате процессов массопереноса, и по структуре соответствует естественному фирну на ледниках. Эта ледяная масса легко формуется и после промерзания представляет собой достаточно прочный монолит.

Теоретические и экспериментальные исследования метода факельного льдообразования, проведенные к настоящему времени, позволяют с достаточной для практики точностью прогнозировать производительность намораживания пористого льда [1]. В последнее время этот метод применялся для ускоренного строительства ледяных переправ и возведения ледяных плотин объемом более 500 000 м^3.

Производительность намораживания пористого льда серийной дождевальной установкой средней мощности ДДН-70 составляет порядка 75 т льда за сутки в пересчете на 1 градус отрицательной суточной температуры воздуха.

При намораживании льда из соленой воды необходимо учитывать теплофизические особенности процесса ее замерзания. Одним из них является зависимость температуры замерзания соленой воды от минерализации, определяющей не только температуру начала замерзания соленой воды, но и соответствие между температурой соленого льда и его фазовым составом. Поэтому замерзание соленой воды сопровождается понижением ее температуры, падением температурного напора и, как следствие, уменьшением производительности намораживания на 5–20% [1, 2].

Накопленный к настоящему времени опыт применения метода факельного льдообразования показал его высокую эффективность при решении ряда практических задач и хорошие перспективы при решении некоторых экологических проблем. Одной из них является применение метода для улучшения качества природных вод и защиты их от загрязнения путем опреснения [3].

Явление опреснения воды вымораживанием известно с давних пор. В его основе лежит

природный процесс разделения соленой воды при замораживании на пресные кристаллы и концентрированный рассол. Замерзание соленой воды сопровождается избирательным ростом ветвистых кристаллов льда, отторгающим в окружающую жидкость кристаллы соли. В итоге незамерзший раствор солей высокой концентрации механически захватывается растущей ледяной массой. Дальнейшее ее промерзание приводит к вымерзанию пресной воды из этих полостей и образованию скелетной структуры льда, содержащей капилляры и замкнутые ячейки с концентрированным рассолом. Повышение температуры льда сопровождается обратным процессом – таянием льда на границе с рассолом, ростом объема жидкой фазы и образованием сквозных капилляров, через которые происходит сток рассола. В результате первые порции талого стока имеют высокую концентрацию солей. После выхода основной массы солей талый сток дает пресную воду. Аналогичные процессы приводят к распреснению многолетних морских льдов, что издавна использовалось жителями Крайнего Севера для получения пресной воды.

До настоящего времени было известно несколько разновидностей опреснения методом естественного вымораживания [1]. Общим их недостатком является небольшая производительность намораживания льда, обусловленная низкой интенсивностью теплообмена, длительность процесса опреснения, связанная с необходимостью прогрева массива льда, и низкий выход опресненной воды, что приводит к относительно высокой ее себестоимости. Поэтому эти способы опреснения естественным вымораживанием не нашли широкого практического применения.

Для устранения указанных недостатков потребовалось значительно повысить производительность намораживания льда, научиться создавать ледяные массивы с пористой, легко фильтрующей воду структурой, резко снизить соленость намораживаемого льда. Эта задача была решена в результате разработки теоретических и прикладных аспектов применения метода факельного льдообразования для очистки и опреснения минерализованных вод.

Особенности применения метода факельного льдообразования заключаются в необходимости регулирования параметров капельного факела (высота факела и средний размер капель) в зависимости от температуры воздуха так, чтобы капля воды при падении замерзала не полностью, а только покрывалась ледяной коркой, которая разбивается при падении и освобождает заключенный в ней рассол. В результате незамерзший рассол вытекает и фильтруется из зоны намораживания, а на месте дождевания формируется и быстро растет в высоту массив пористого льда, состоящий из пресных осколков ледяных скорлупок и небольшого количества взвешенного рассола, удерживаемого капиллярными силами.

Математическое моделирование таяния–опреснения минерализованного пористого льда [1] и последующие лабораторные и натурные экспериментальные исследования, выполненные в различных регионах (в Москве, Волгограде, Саратове, на Шпицбергене) с применением как морской воды, воды естественных соленых озер, так и стоков различных производств (АЭС, целлюлозно-бумажного комбината), показали высокую эффективность метода [4].

В экспериментальных исследованиях по деминерализации сбросных вод шламоотвалов Балаковской АЭС изучался химический состав этих вод и намороженного из них пористого льда, а также динамика выхода ионов солей при его таянии [4]. Результаты натурных экспериментов со сбросными водами Балаковской АЭС представлены в табл.1 и 2.

Таблица 1

Химический состав воды и полученного из нее пористого льда, намороженного дождевальной установкой «Град-1»

	Содержание ионов, мг/л							Сумма ионов
	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	
Вода	114	398	3379	204	47	1580	27	5749
Лед	21	34	256	20	5	121	3	461

Таблица 2

Динамика выхода ионов солей со стоком при таянии пористого льда

№ пробы	pH	Содержание ионов в стоке, мг/л							Сток, %	Остаток ионов во льду, %
		HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+		
1	6,75	56,1	234,3	1790,4	131,2	35,0	826,0	14,8	8,1	42,1
2	-	41,2	100,0	733,2	21,2	14,0	381,3	7,8	15,4	17,7
3	6,60	24,9	44,0	309,6	29,0	7,9	143,7	3,5	24,5	7,1
4	6,70	17,1	19,9	139,2	15,6	2,3	63,9	1,9	38,7	2,2
5	6,60	13,4	2,9	28,9	3,4	0,9	12,9	1,2	49,9	1,0
6	6,80	13,2	1,4	8,2	5,4	0,9	4,1	0,4	60,1	0,4
7	6,78	13,2	0,4	1,4	3,2	0,7	1,4	0,0	91,7	0,1

Таким образом, минерализация ледяного массива еще в процессе намораживания снижается в 10–12 раз, а при таянии 25(50)% ледяного массива его минерализация уменьшается еще в 14 (100) раз. Аналогичный результат наблюдается и по отдельным ионам, за исключением HCO_3^-. Такое поведение гидрокарбонатного иона имеет место и в других способах опреснения.

Результаты проведенных исследований показали, что динамика выхода макроионов различных солей, микроэлементов и растворенной органики одинаково высока [4]. Так, при таянии 1/3 объема льда минерализация оставшейся части массива снижается еще на порядок и в итоге приблизительно в 100 раз ниже минерализации исходной воды. Необходимая степень очистки опресняемой воды определяется величиной ПДК химических элементов и соединений, входящих в состав сточных вод и влияющих на величину выхода пресной воды и объем остаточного рассола.

Преимущества метода факельного вымораживания обусловлены следующими причинами:

- высокая производительность намораживания льда – 75 м³/(град·сут), при этом потенциальная производительность намораживания льда при непрерывной работе дождевателя ДДН–70 в течение холодного времени года изменяется от 75 000 т на Западе России до 500 000 т в центральных районах Сибири и Якутии;
- пористая, легко фильтрующая рассол структура намораживаемого льда;
- возможность регулирования фазового состава замерзающих капель и температуры ледяного массива;
- низкая минерализация намораживаемого льда;
- высокий выход опресненной воды;
- низкая энергоемкость процесса – 1,1 (2,4) кВ·ч/м³ при температуре воздуха –15 (–5)°С.

Кроме того, метод факельного льдообразования не требует больших капитальных и энергетических затрат, так как используются природные источники энергии: отрицательная температура воздуха при замораживании воды; положительная температура воздуха и солнечная радиация при таянии льда, в ходе которого осуществляется сепарация и удаление рассола. Энергия расходуется в основном для подачи воды на место проведения работ. Применение метода не связано с использованием дорогостоящих опреснительных установок и предварительной очисткой воды от нерастворимых примесей, так как массив пористого льда выступает в роли естественного фильтра.

Сравнение эффективности опреснения минерализованной воды промышленными способами и методом факельного вымораживания представлено в табл.3.

Так, если в большинстве традиционно используемых методов опреснения содержание наиболее распространенных ионов в опресненной воде снижается в 10–30 раз по сравнению с исходной водой, то методом факельного вымораживания достигается снижение концентрации этих ионов примерно на два порядка. Исключение составляет аномальное поведение иона HCO_3^-. При использовании традиционных методов деминерализации содержание гидрокарбонатного иона уменьшается лишь в 1,5–4,0 раза, а методом факельного вымораживания – примерно в 9 раз.

Метод факельного вымораживания использует запасы холода приземного слоя атмосферы для получения пористого слабоминерализованного льда. Это обуславливает ряд его особенностей: сезонный характер процесса намораживания–таяния, зависимость его от климатических и гидрологических условий, необходимость учета ландшафтных особенностей. Эти физико-географические факторы влияют на экономическую эффективность применения метода и должны учитываться при разработке соответствующих проектов.

Для прогнозирования эффективности применения

Таблица 3

Результаты опреснения воды разными способами

Проба воды	*Общая минерализация, г/л*	*Содержание ионов, мг/л*					
		Na^+, K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	Mg^{2+}	Cl^-
Промышленное вымораживание							
Исходная	15,3	2740	340	800	175	5400	2260
Опресненная	0,7	180	20	26	55	200	190
Электродиализ							
Исходная	8,5	2500	600	50	60	4400	900
Опресненная	0,5	150	50	6	40	200	50
Обратный осмос							
Исходная	4,9	1130	500	124	32	2500	420
Опресненная	0,7	200	42	20	13	300	7
Ионный обмен							
Исходная	11,4	3060	560	280	980	4060	2440
Опресненная	0,7	350	40	7	590	250	47
Факельное вымораживание							
Исходная	5,7	1607	204	47	114	380	3379
Опресненная (при выходе 50%)	0,06	14	3	1	13	3	29

метода в конкретных физико-географических условиях на основе анализа климатических условий холодного периода года, приведенных в Атласе снежно-ледовых ресурсов мира [5], оценены потенциальные объемы искусственных ледяных массивов. Для расчета производительности намораживания льда за холодный период применялась эмпирическая зависимость [2]:

$$Q=0{,}01G\ (3N + 1{,}2\Sigma T_a),$$

где G – расход воды дождевальной установкой;
N – число суток со средней суточной температурой воздуха ниже –5°С;
ΣT_a – сумма отрицательных градусосуток (°С) за период N суток.

На основе этих расчетных данных была построена карта потенциального намораживания искусственных ледяных массивов (см. рисунок).

Расчеты показали, что производительность намораживания льда изменяется от 10–20 тыс. м^3 в водном эквиваленте в южных регионах России до 500 тыс. м^3 в наиболее холодных районах при использовании одной дождевальной установки средней производительности ДДН-70.

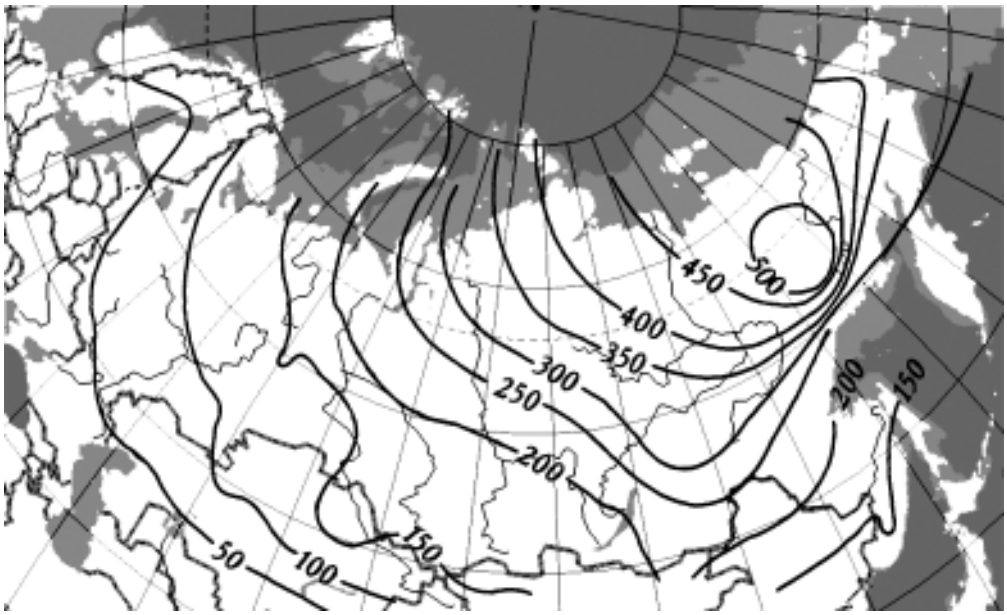
Одним из путей применения метода факельного вымораживания является распреснение и очистка загрязненных минерализованных озер и водоемов [3]. Проблема засоления пресных озер и образования соленых водоемов антропогенного происхождения, возникающих в результате многолетнего сброса минерализованных технических вод и бытовых стоков в пониженные участки рельефа местности, становится все актуальнее в настоящее время.

Частичное или полное их распреснение достигается путем забора в зимний период соленой воды на намораживание–опреснение. При небольшом объеме озера вся вода замораживается на берегу (при этом можно провести работы по очистке его ложа), первые порции минерализованного талого стока отводятся за пределы бассейна, а пресная вода самотеком поступает в чашу озера. При большом объеме воды в озере такая технология, периодически осуществляемая, будет из года в год понижать минерализацию воды в озере.

Применение метода факельного вымораживания для очистки сточных вод от загрязнения имеет ряд особенностей. Они обусловлены как разной минерализацией и различием происхождения соленых вод (шахтных, промышленных, гидромелиоративных систем и др.), так и необходимостью минимизации количества остаточного рассола и максимального роста его солесодержания. Поэтому разработан ряд технологических схем, позволяющих в течение нескольких циклов вымораживания добиться необходимого повышения концентрации рассола. Они включают как выбор технологического режима намораживания, так и регулирование направлением и моментом начала сброса талой воды разной минерализации в пруд-накопитель или пруд-испаритель.

Таким образом, высокая эффективность метода факельного вымораживания, его технологичность, широкая доступность и экономичность позволяют успешно применять этот метод в районах с температурами воздуха ниже –5...–10°С для решения ряда экологических задач, направленных на защиту природных вод от загрязнения и улучшение их качества. В их числе очистка и опреснение загрязненных стоков (промышленных, бытовых и сельскохозяйственных, шахтных вод и т.п.), распреснение соленых озер и водоемов, промывка и восстановление засоленных земель [6,7].

Искусственные ледяные массивы, аккумулирующие в себе большие запасы воды и природного холода, позволяют по-новому оценить возможности их применения не только для защиты от химического и механического, но и от теплового загрязнения природных вод, которое приводит к нарушению экологического равновесия, развитию специфических водорослей, разрушению экосистемы



Потенциальное намораживание искусственных ледяных массивов за зиму с применением метода факельного льдообразования, тыс. т

водоемов, их цветению и зарастанию. Другой возможностью применения природного холода, аккумулированного в искусственных ледниках, является его использование для мелиорации, создания микроклимата, в системах охлаждения различных производств, энергетике, сельском и коммунальном хозяйстве, что будет способствовать экономии топливно-энергетических ресурсов.

Литература

1. Сосновский А.В. Особенности процесса опреснения соленых вод при факельном намораживании льда // Мат. гляциологических исследований. 1988. Вып.61. С. 143–149.

2. Осокин Н.И., Сосновский А.В. Использование гляциоклиматической информации для оценки эффективности искусственного льдообразования как метода защиты природных вод от загрязнения // Мат. гляциологических исследований. 2000. Вып.88. С.46–49.

3. Сосновский А.В., Ходаков В.Г. Способ опреснения соленой и морской воды: А.с. 1130531 СССР // Б.И. 1984. №47. С. 76.

4. Востокова Т.А., Гохман В.В., Сосновский А.В. Очистка природных и техногенных вод от органических примесей и микроэлементов методом факельного вымораживания // Мат. гляциологических исследований. 1993. Вып.76. С.134–138.

5. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира. – М.: РАН, 1997.

6. Сосновский А.В., Ходаков В.Г. Способ промывки засоленных земель: А.с. 1612052 СССР // Б.И. 1992.

7. Сосновский А.В., Ивлиев С.А., Осокин Н.И., Самойлов Р.С. Способ возведения земляного полотна на мелководных озерах: Пат. 2060314 РФ от 20.05.96.

Короткие сообщения

Правительство одобрило новую редакцию Водного кодекса

Российское правительство 18 февраля одобрило новую редакцию Водного кодекса. Об этом сообщил заместитель Министра экономического развития и торговли М.Циканов. Он отметил, что проект будет доработан в Минэкономразвитии в течение месяца, а затем внесен на рассмотрение в Госдуму РФ.

По словам М.Циканова, новая редакция предусматривает разрешение двух основных проблем - экологической, «так как качество воды ухудшается», а также вопрос доступа к водным объектам водопользователей, который в настоящее время «неравномерный и непрозрачный». Таким образом, новая редакция Водного кодекса предусматривает ужесточение экологических требований, а именно - введение новых нормативов сброса загрязняющих веществ в водоемы и их количественное содержание в воде.

М.Циканов также сообщил, что координировать все вопросы, связанные с использованием водных объектов, будет единый федеральный государственный орган, так называемый «единый балансодержатель». Этот единый орган должен будет заменить существующие в настоящее время 16 бассейновых управлений. Он будет иметь 10 филиалов – соответственно количеству бассейновых округов, на которые будет поделена вся территория России. Каждый округ будет включать один или несколько бассейнов главных водных объектов.

В новой редакции Водного кодекса предусматривается установление федеральной собственности на водные объекты за исключением обособленных объектов (пруды, водохранилища, которые могут находиться как в госсобственности, так и в муниципальной, а также в собственности граждан и юридических лиц).

С вступлением в силу новой редакции Водного кодекса водный налог будет заменен на платежи за пользование водными объектами. По словам М.Циканова, в настоящее время правительство готовит соответствующие поправки в Налоговый кодекс. До вступления Водного кодекса в действие на переходный период будет продолжать действовать водный налог, после этого необходимо будет заключать гражданско-правовые договоры с единым органом, который будет координировать всю деятельность, связанную с доступом к водным объектам.

По новому кодексу граждане России смогут приобрести в частную собственность водный объект площадью более 2 тыс.м^2. Сейчас Водный кодекс предусматривает, что в частную собственность может быть приобретен водный объект площадью до 2 тыс.м^2. Однако Правительство РФ признало целесообразным увеличить площадь.

М.Циканов подчеркнул, что водный объект может быть приватизирован только в том случае, если он не имеет гидравлической связи с другими водными объектами и если он расположен на земле, принадлежащей потенциальному покупателю.

top.rbc.ru