

# Климатологические основы концепции водных масс океаносферы

**Н.М. Адров**

*Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН;  
Биологический факультет МГТУ, кафедра биологии*

**Аннотация.** В работе проведён анализ материала морских экспедиций и мировых центров океанологических данных наблюдений температуры ( $T$ ) и солёности ( $S$ ), положенный в основу теории водных масс океаносферы. Введено понятие векторов термогалинной ( $T,S$ -) трансформации, с помощью которых даны оценки величины и направления энерго- и влагообмена между водными и воздушными массами. С помощью статистических диаграмм рассеяния термогалинных индексов разработан метод расчёта адвективной и конвективной составляющих трансформации водных масс. Выделенные водные массы представлены в терминах объект, признак, класс, что позволило использовать методы распознавания образов для экспериментальной проверки правомерности исходных положений теории.

**Abstract.** The paper contains the analysis based on results of marine expeditions and world centres of oceanological data of temperature ( $T$ ) and salinity ( $S$ ) observations. The theory of oceanosphere water mass has been founded on the basis of these materials. The notions of thermohaline transformation vectors have been introduced. The method of calculation of advective and convective constituents' transference of water mass has been worked out with the help of statistic diagrams of the thermohaline indices' dispersion.

## 1. Введение

Обширная современная база данных и высокий уровень вычислительной техники позволяют на основе расчётов и обобщений не только выявить пространственные и временные взаимосвязи между параметрами температуры, солёности и плотности морской воды, но и решить проблему объективной классификации водных масс, актуальность которой обусловлена потребностями прогнозирования изменчивости климата и решением ряда практических проблем (Адров, 1999).

Поставлены задачи: 1) обосновать физический смысл изменчивости океанологических характеристик как косвенных показателей энерго- и массообмена океана с окружающими геосферами; 2) выявить основные закономерности структуры водной толщи океаносферы и выразить их в количественной форме; 3) оценить адвективные и конвективные составляющие трансформации водных масс.

## 2. Краткий аналитический обзор

Профили вертикального распределения термогалинных свойств вод, которые использовались для анализа структуры водной толщи, предложил Бьёрн Гелланд-Ганзен (*Helland-Hansen*, 1918). Впоследствии проведена классификация районов океана по термогалинным профилям (*Jakobsen*, 1929) и сделаны попытки связать их с гидродинамическими представлениями об океане (*Тюряков*, 1964). Начало  $T,S$ -анализу с гидродинамическим уклоном, в котором термогалинные профили выражают функциональную связь между температурой и солёностью, а  $T,S$ -кривые одинаковой конфигурации определяют набор слоёв перемешивающихся водных масс, положено работой В.Б. Штокмана, опубликованной в № 1 "Проблем Арктики" за 1943 г. (*Штокман*, 1970). Георг Вюст по экстремумам температуры и солёности смог проследить непрерывное распространение вод от "очага" до района вырождения (*Wüst*, 1936). А. Дефант выделил сравнительно небольшую по объёму тёплую океаническую "тропосферу" и холодную "стратосферу", границу между которыми на поверхности океана определяет Главный океанический фронт (*Defant*, 1961). Р. Монтгомери было сделано важное заключение о том, что воды открытого океана имеют очень узкий спектр солёности, главным образом, от 34 до 37 ‰ (*Montgomery*, 1955). Еще один статистический способ анализа частотного распределения  $T,S$ -индексов был предложен Кокрейном (*Coccrane*, 1958). Границы сгущений индексов послужили для него характеристиками пределов температуры и солёности водных масс. В дальнейшем такой способ представления водных масс был использован в работах Института океанологии (*Галёркин*, 1984; *Карандашева*, 1988).

Пропорциональное изменение термогалинных свойств вод океана и передачу этих свойств в горизонтальном и вертикальном направлениях впервые заметил К.О'Д. Айзлин (*Iselin*, 1939), а первые

сведения о линейной зависимости между температурой и солёностью были опубликованы в фундаментальной работе Г. Свердрупа с соавторами (*Sverdrup et al.*, 1942). Воды, в которых наблюдалась эта зависимость, были названы "центральными". Впоследствии О.И. Мамаевым были построены  $T,S$ -прямые вод океанов (*Мамаев*, 1970), но они, как и разложение Генри Стоммелом  $T,S$ -вектора на составляющие (*Stommel*, 1980), не получили должного развития в качестве критерия взаимодействия водных и воздушных масс. Ближе всего к представлению о физической природе "структурных зон" Мирового океана, по данным первых отечественных информационных баз ВНИИГМИ-МЦД, подошли специалисты ИОАН под руководством проф. В.Н. Степанова, подытожившего результаты исследований в книге "Океаносфера" (*Степанов*, 1983).

### 3. Материал и методы

В качестве основных использовались сведения Мировых центров данных NOAA/NODC (782219 станций), ВНИИГМИ-МЦД (90155 станций) и материалы экспедиций: ММБИ, ПИНРО, СРПР, МУГКС и МФ ААНИИ. Для анализа структуры водных масс в масштабе Мирового океана использовались диаграммы рассеяния  $T,S$ -индексов (данные CD-ROM NODC "Global Ocean Temperature and Salinity Profiles" Vol. 1 – Atlantic, Indian and Polar Oceans; Vol. 2 – Pacific Ocean) в 503 квадратах WMO.  $T,S$ -диаграммы рассеяния, построенные по всем данным, собранным за вековой период наблюдений, подтвердили устойчивость термогалинной структуры вод всех океанов. Анализ материалов показал, что существуют типы распределения  $T,S$ -индексов, которые можно продемонстрировать, выбрав среди набора похожих диаграмм наиболее показательные. Визуальное различие силуэтов дает достаточно наглядный, хотя и сложный образ водных масс, не разделяемых пока ни по климатическим, ни по структурным признакам. Такую классификацию водных масс можно назвать чисто океанографической, подобной известным наборам  $T,S$ -кривых, построенных для крупных регионов.

Несмотря на различия диаграмм, они имеют одну связывающую их воедино особенность – участок с пропорциональным изменением температуры и солёности, принадлежащий общей для океана линейной термогалинной зависимости, рассчитанной методом наименьших квадратов, начиная от региональных участков водных масс и кончая глобальными подразделениями (*Адров*, 1993). Если обобщить все материалы и представить себе единую океанскую водную массу, то пропорциональное изменение температуры и солёности можно выразить в виде главного вектора АВ (рис. 1), который моделирует пропорциональное расходование тепла и влаги океана, затраченное на работу по перемещению частиц воды из тропических районов в полярные (адвекция) и от поверхности океана вглубь водной толщи (конвекция).

Рис. 1. Главный вектор  $T,S$ -трансформации вод  $Q$  (АВ), поле  $T,S$ -индексов фронтальных вод  $F$  и водных масс  $H$ , блокирующих активное взаимодействие всей водной толщи океана с атмосферой

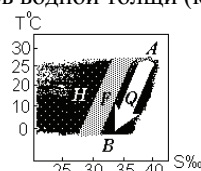
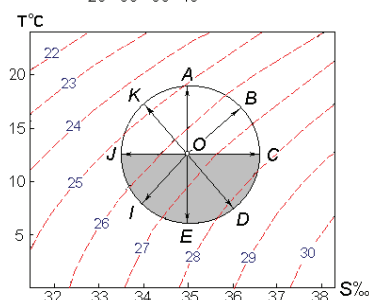


Рис. 2. Векторы явных ( $OJ$ ,  $OI$ ,  $OE$ ,  $OD$ ,  $OC$ ) и скрытых ( $OK$ ,  $OA$ ,  $OB$ ) процессов термогалинной трансформации в пространстве температура-солёность-плотность идеализированного равновесного океана



### 4. Модель равновесного океана

Линейные участки термогалинных профилей, горизонтальное положение изопикнических поверхностей, разделение водной толщи на тропосферу с преимущественно адвективного, и стратосферу – конвективного переноса, позволяют преобразовать схему векторов термогалинной трансформации в координатах температура-солёность-плотность (рис. 2). Этот идеализированный равновесный океан отражает главное физическое свойство реального океана, который, находясь в постоянном контакте с атмосферой, непрерывно отдаёт полученное от Солнца тепло, превращаемое в движение частиц воды и воздуха. Поэтому, подобно реальной атмосфере, в которой причиной циркуляции является восходящее движение частиц воздуха, обогащённого водяным паром, главной причиной идеализированной безадвективной, т.е. механически не связанной с атмосферой, циркуляции в океане является нисходящее движение частиц морской воды. Но механическое воздействие ветра как циклонической циркуляции

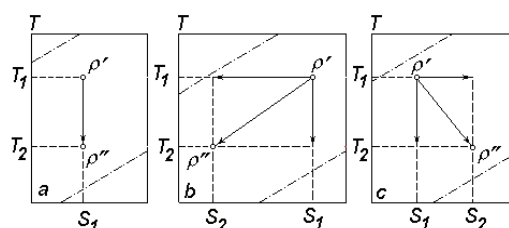
атмосферы вызывает адвективное перемещение морских вод, которое, как следует из схемы, может иметь две крайние формы выражения – изо- и диапикническую.

### 5. Адвективные и конвективные составляющие

От того, какой физический смысл придать адвективным изменениям температуры перемещающейся условной частицы воды, имеющей в начальный момент времени  $t_1$ , широту  $\varphi_1$ , долготу  $\lambda_1$  и глубину  $H_1$ , а в конечный момент времени  $t_2$ , соответственно, широту  $\varphi_2$ , долготу  $\lambda_2$  и глубину  $H_2$ , зависит способ количественной оценки адвекции. Если принять, что уменьшение температуры вод, переносимых из  $A$  в  $B$ , есть мера затрат энергии на перемещение частиц, то это позволит сделать оценки трансформации водных масс. Адвективное перемещение связано с горизонтальным ( $H = \text{const}$ ), а конвективное – с вертикальным переносом ( $\varphi, \lambda = \text{const}$ ).

Представим конвекцию и адвекцию частиц воды, изображенными в пространстве  $T, S, \rho$  (рис. 3). Отметим, что при переходе из пространства  $\varphi, \lambda, H$  в пространство  $T, S, \rho$  теряет смысл разделение адвекции и конвекции как горизонтальной и вертикальной составляющих циркуляции. Появляется иной смысл разделения, состоящий в том, что оно проводится на основе различия вкладов двух способов передачи энергии в изменение термогалинных свойств вод.

Рис. 3. Изменение температуры, солёности и плотности воды в условиях конвекции (а), изопикнической (b) и диапикнической (c) адвекции



Расход тепла частицы определяется разностью между температурами, а расход массы – разностью между величинами солёности в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ . Эти разности названы бюджетами температуры и солёности частиц воды:  $\delta T = T_2 - T_1$ ,  $\delta S = S_2 - S_1$ .

Соотношение массо- и теплообмена между океаном и атмосферой, выраженное отношением  $P = \delta S / \delta T$ , служит параметром трансформации водных масс. Условие  $P = \text{const}$  указывает на то, что для каждой точки пространства  $\varphi, \lambda, H$ , расположенной в пределах системы циркуляции открытого океана, отношение массообмена к теплообмену между океаном и атмосферой остается величиной постоянной. Если эти точки рассматривать в пространстве  $T, S$  в виде водной массы  $AB$ , тогда величины  $\delta T = T_2 - T_1$  и  $\delta S = S_2 - S_1$  будут служить эквивалентами тепло- и влагообмена между океаном и атмосферой.

### 6. Вычислительные эксперименты прогнозирования ледовитости, тепловых характеристик сезонов и срока преднерестовых миграций рыбы на примере Баренцева моря

Чтобы проверить практическую применимость выявленных взаимосвязей между изменчивостью температуры и солёности, проведены вычислительные эксперименты по прогнозированию на ретроспективном материале: 1) географического положения границы дрейфующего льда, 2) тепловых характеристик сезонов на Кольском п-ове и 3) типа нерестового подхода рыбы к берегам Мурмана (Адров, Смоляр, 1988).

Задачи прогнозирования решались одновременно на двух представлениях водных масс: 1) определяемых по  $T, S$ -признаку принадлежности к системе Гольфстрима (показатель  $Q$ ) и 2) тёплых-холодных (показатель  $T$ ). Для оценки результатов расчетов использовалась методика распознавания образов (Загоруйко, 1972).

В итоге сделан вывод о том, что учёт солёности в прогностических моделях позволил значительно улучшить качество полученных решений. Результаты анализа зависимостей между прогнозируемыми характеристиками и полями  $Q$  интерпретируемы, а между прогнозируемыми характеристиками и полями  $T$  – нет. Это дает основание считать, что поля  $Q$  адекватно, а поля  $T$  неадекватно описывают соотношения водных масс различного генезиса.

### 7. Эксперимент "Оледенение Северо-Европейского океанического бассейна"

В следующем эксперименте акватория бассейна подвергалась постепенному охлаждению при условии сохранения исходных величин солёности постоянными. В результате количество атлантических вод увеличивалось. Поскольку условие уменьшения температуры при постоянстве солёности определяет конвекцию, то атлантические воды при любой отдаче тепла лишь повышают свою сопротивляемость выхолаживанию за счёт вертикального замещения частиц водной массы.

Но когда были заданы условия уменьшения солёности на 0.1, 0.2, 0.3 % и т.д. при условии сохранения исходных величин температуры постоянными, то уменьшение солёности на 0.9 % привело к полному исчезновению атлантических водных масс, т.е. к условиям, способствующим сплошному оледенению моря. Аналогичные эксперименты с Баренцевым морем (Адров, 2000; 2001) привели к ещё меньшим величинам опреснения, способным превратить субарктическую незамерзающую поверхность океана в арктический ледовый покров. Таким образом, энергетические воздействия на океан не могут дестабилизировать климат полярных районов, а нарушение массообмена приводят к значительным эффектам. В природе взаимодействия геосфер не существует разделения энергомассообменов, вызывающих адвективные и конвективные перемещения частиц водных и воздушных масс, и преобладание одного из них вызывает синергетическую компенсацию, что восстанавливает равновесие и служит гарантом постоянства климата.

## 8. Расчёт морских сезонов

Проблема расчёта сезонов по океанологическим характеристикам водных масс решалась нами неоднократно различными приёмами, в том числе и на основе метода распознавания образов (Адров, Слободин, 1993; Адров и др., 1997), когда для определения принадлежности всех месяцев года служила формальная процедура отнесения их к одному из двух исходных месяцев – зимнему или летнему. Отказ от распознавания принимался как присвоение данному месяцу названия промежуточного между зимним и летним, то есть либо весеннего, либо осеннего. В конечном итоге, взятые за основу даже самые очевидные традиционные приближения (разделение сезонов по календарным периодам или изменчивости температуры на фиксированных горизонтах) дали трудно интерпретируемый результат. Поэтому было решено использовать одно из главных свойств сезонной изменчивости водных масс: сезонная стратификация верхнего слоя. Тем более, что сезонность – это понятие, в первую очередь, биологическое, и по мнению специалистов, сезонный пикноклин играет решающую роль в формировании физических условий для массового развития растений.

Чтобы перейти от содержательной к формальной постановке задачи расчёта сезонов, требуется конкретная оценка пикноклина. Для этого проанализированы данные вертикального распределения плотности и установлены величины  $X = D_o - D_n$ , где  $D_o$  – плотность воды поверхности моря, и  $D_n$  – плотность воды на глубине  $H$  м, характеризующей нижнюю границу фотического слоя. Эти величины послужили количественными критериями времени наступления сезонов: зимой они минимальны, летом максимальны, а весной и осенью имеют промежуточные значения.

Наиболее интересным и необычным представляется октябрь, потому что южная половина моря полностью переходит к осеннему сезону, а северная – сохраняет летние условия. Для того, чтобы глубже понять эту и многие другие неординарные особенности хода сезонов в Баренцевом море (появление летних "оазисов" в типично зимние месяцы и наоборот – возникновение зимних условий по соседству с "летними" водами), мы провели дополнительный анализ расчетов сезонов по данным температуры и солёности (Адров, Голубев, 2001).

При сравнении полей сезонов, рассчитанных по данным температуры и плотности, отмечается идентичность обеих схем расчета в типично зимние (январь-март) и летние (июль, август) месяцы. Подобие карт сезонов, рассчитанных по данным солёности и плотности, соблюдается в весенние (май, июнь) и осенние (октябрь-декабрь) месяцы.

## 9. Заключение и выводы

Как выяснилось в результате расчётов, данные о температуре и солёности по отдельности не дают объективной картины климатических (горизонтальных) границ водных масс, лишь учёт термогалинной зависимости даёт основание для количественных оценок. Вертикальная термогалинная структура водной толщи океана, отражающая специфику энерго- и влагообмена с атмосферой в различных климатических зонах, описывается положением и наклоном линий трансформации центральных водных масс. Постоянство угла наклона вектора термогалинной трансформации может служить основой определения климата как статистического ансамбля состояний системы геосфер, содержащих воду в трёх агрегатных состояниях. Пропорциональные изменения температуры и солёности позволили построить модели термогалинной трансформации водных масс океана. Проверка адекватности моделей вычислительными экспериментами показала следующее:

1) Климатические признаки водных масс определяются знаком бюджета солёности: в тропических и полярных водах он положителен, а в субтропических и субполярных – отрицателен.

2) Отрицательный бюджет солёности водных масс является главным фактором устойчивости систем циркуляции Мирового океана и причиной изопикничности адвективного переноса – основной формы горизонтальной циркуляции.

3) Диапикническая адвекция, наблюдается в тропических и полярных водных массах высоких и низких широт. Особенно большую роль она имеет в полярных районах океана, где вместе с термической конвекцией усиливает вертикальный водообмен.

4) Конвекция достигает наибольшей мощности в субполярных водах, а расход тепла, оцениваемый как отрицательный бюджет температуры при постоянной солёности (условие конвекции), характеризует экстремальное для общей характеристики климата Земли тепловое воздействие водных масс в зимний период года.

## Литература

- Cocrane J.D.** The frequency distribution of water characteristics in the Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.*, v.5, N 2, p.111-127, 1958.
- Defant A.** Physical Oceanography. *New York, Pergamon Press*, v.1, 745 p., 1961.
- Helland-Hansen B.** Nogen hidrografiske metoder. Forh. ved de skand. naturforskere 16-de mote (Juli 1916), *Kristiania*, p.357-359, 1918.
- Iselin C. O'D.** The influence vertical and lateral turbulence on the characteristics of the waters at mid. depth. *Nat. Res. Counc. Amer. Geophys. Union Trans.*, N 3, p.414-417, 1939.
- Jacobsen J.P.** A contribution to the hydrography of the North Atlantic. The Danish "Dana" expedition 1920-1922 in the North Atlantic and Gulf of Panama. *Oceanographical Rept.*, N 2, p.4-43, 1929.
- Montgomery R.B.** Characteristics of surface water at Weather Ship. *J. Deep-Sea Res.*, N 3, p.331-334, 1955.
- Stommel H.** How the ration of meridional flux of fresh-water to flux of heat fixes the latitude where low salinity intermediate water sinks. *Tellus*, v.32, N 6, p.562-566, 1980.
- Sverdrup H.U., Johnson M.W., Fleming R.H.** The oceans, their physics, chemistry and general biology. *New York*, 1059 p., 1942.
- Wust G.** Schichtung und Zirculation des Atlantischen Ozeans. Des Bodenwasser und die Stratosphare. *Meteor.*, Bd 6, Teil I, 1936.
- Адров Н.М.** Великие полыньи, солёностные аномалии и вычислительные эксперименты оледенения Северо-Европейского океанического бассейна. Вековые изменения морских экосистем Арктики. *Мурманск, обл. изд.*, с.8-12, 2000.
- Адров Н.М.** Вычислительные эксперименты по проверке прогностических гипотез на материалах температуры и солёности вод Баренцева моря. VIII Всероссийская конф. по проблемам рыбопромыслового прогнозирования. *Мурманск, ПИИРО*, с.6-8, 2001.
- Адров Н.М.** Использование термогалинных характеристик баренцевоморских вод для гидрометеорологического и рыбопромыслового прогнозирования. Современные технологии и прогноз в полярной океанологии и биологии. *Апатиты, КНЦ РАН*, с.58-99, 1999.
- Адров Н.М.** Трансформация водных масс системы Гольфстрима. *Апатиты, изд. КНЦ РАН*, 171 с., 1993.
- Адров Н.М., Голубев В.А.** Расчёт арктических сезонов по данным стратификации водной толщи на примере Баренцева моря. Седиментологические процессы и эволюция морских экосистем в условиях морского перигляциала. *Апатиты, КНЦ РАН*, Книга 2, с. 100-108, 2001.
- Адров Н.М., Матишов Г.Г., Слободин В.П.** Расчёт сезонов в водах Баренцева моря. *Доклады РАН*, т.355, № 3, с.394-396, 1997.
- Адров Н.М., Слободин В.П.** Расчёт сезонов в Баренцевом море по термогалинным данным на границах фотического слоя. Препринт. *Апатиты, изд. КНЦ РАН*, 31 с., 1993.
- Адров Н.М., Смоляр И.В.** Построение полей водных масс Баренцева моря и их использование для решения задач гидрометеорологического и рыбопромыслового прогнозирования. Препринт. *Апатиты, КФ АН СССР*, 44 с., 1988.
- Галёркин Л.И.** Двумерная статистика термогалинных полей и водные массы Северной Атлантики. *Тр. ВНИИГМИ-МЦД*, № 102, с.108-134, 1984.
- Загоруйко Н.Г.** Методы распознавания и их применение. *М., Советское радио*, 208 с., 1972.
- Карандашева Т.К.** Стратификация, термогалинные поля и циркуляция вод Норвежского и Гренландского морей. *М., Гидрометеиздат*, 180 с., 1988.
- Мамаев О.И.** Т,S-анализ вод Мирового океана. *Л., Гидрометеиздат*, 363 с., 1970.
- Степанов В.Н.** Океаносфера. *М., Мысль*, 271 с., 1983.
- Тюряков Б.И.** О районировании Северной Атлантики по принципу одинаковости структуры водных масс. *Тр. Ленинградского гидромет. ин-та, Л., Гидрометеиздат*, т.3, № 17, с.17-37, 1964.
- Штокман В.Б.** Избранные труды по физике моря. *Л., Гидрометеиздат*, 336 с., 1970.