

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР  
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
HYDROMETEOROLOGICAL INSTITUTE IN Leningrad

Transactions

Труды  
вып. 32

vol. 32

06  
778

# ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРОБЛЕМЕ ОКЕАН—АТМОСФЕРА

INVESTIGATIONS  
ON THE OCEAN — ATMOSPHERE PROBLEM

Сборник 2

работ научно-исследовательского института взаимодействия океана  
и атмосферы

issue 2

of the papers of the air sea interaction institute

24443

**БИБЛИОТЕКА**  
Ленинградского  
Гидрометеорологического  
Института

ЛЕНИНГРАД  
1970

Сборник содержит результаты исследований взаимодействия океана и атмосферы, выполняемых в Ленинградском гидрометеорологическом институте. Статьи посвящены формированию процессов в реальных океанах и морях, изменению метеорологических и гидрологических условий и их прогнозу. Некоторые статьи имеют теоретическое и методическое содержание.

Сборник рассчитан на широкий круг океанологов, метеорологов и геофизиков, а также на преподавателей, аспирантов и студентов.

Научный редактор **В. В. Тимонов**

Ответственный редактор *О. А. Алекин*

2—9—6

Труды Ленинградского Гидрометеорологического института  
Исследования по проблеме океан — атмосфера

СБОРНИК 2

Работ научно-исследовательского института взаимодействия океана и атмосферы

Редактор *Б. И. Леонова*

---

М-13 525. Сдано в набор 21/V-1968 г. Подписано к печати 2/VII-1970 г. Формат бум. 70 × 108<sup>1/16</sup>.  
Бумага тип. № 3. Печ. л. 16. Уч.-изд. л. 19. Тираж 500. Заказ 2329. Цена 1 р. 84 к. Тем. план 1968 г.

---

Типография профессионально-технического училища № 4. Ленинград, 12-я Красноармейская ул., 27.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Часть первая. ФИЗИКА ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ

#### Теория, эксперименты, методы расчета

	Стр.
<i>В. М. Радикевич.</i> Исследование некоторых характеристик взаимодействия пограничных слоев атмосферы и моря на основе новой теоретической модели	3
<i>А. С. Балуева, В. Н. Веретенников.</i> К теории нестационарных чисто дрейфовых течений в океане	16
<i>А. С. Балуева, В. Н. Веретенников.</i> К вопросу о расчете ветрового нагона	23
<i>В. А. Макаров.</i> О распространении длинной волны в канале переменной ширины	30
<i>Л. И. Борис.</i> О расчете внутренних приливных волн и связанных с ними течений в океане	33
<i>Б. А. Каган, А. В. Некрасов, Р. Э. Тамсалу.</i> Расчет приливных явлений в море с учетом горизонтального турбулентного трения	50
<i>А. В. Некрасов.</i> Использование соотношений между уровнем и его наклоном при анализе приливных колебаний	56
<i>А. Б. Мензин.</i> Об электрической аналоговой модели глубинной циркуляции	64

#### Формирование процессов в реальных океанах и морях

<b>В. В. Тимонов</b> . Очаги взаимодействия океана и атмосферы	69
<i>В. М. Радикевич.</i> Основные причины изменений сезонных величин турбулентного потока тепла и затрат тепла на испарение в Северной Атлантике	76
<i>И. П. Карпова.</i> К вопросу об устойчивости атмосферы над Северной Атлантикой	81
<i>Н. Л. Козутовский.</i> К обмену теплом и солями между верхним слоем и глубинными водами Северной Атлантики	85
<i>Б. И. Тюрков.</i> Расчетная схема изменений структуры деятельного слоя Охотского моря от сезона к сезону	94
<i>В. П. Хрол.</i> Метод расчета адвективных изменений толщины льда вдоль восточно-американского пути перемещения льдов	121

#### Изменение метеорологических и гидрологических условий, их прогноз

<i>Б. Б. Елекоев.</i> Об изменении длины планетарных волн при переходе от зональной циркуляции к меридиональной	138
<i>А. А. Гирс.</i> Учет развития макросиноптических процессов при изучении причин изменения фоновых характеристик гидросферы	145
<i>А. И. Савичев.</i> К вопросу о прогнозе барического поля над Северной Атлантикой в июле	169
<i>Е. И. Серяков, В. П. Карауловский.</i> Расчет вариаций месячных величин потерь тепла на испарение и теплообмена с атмосферой в Северной Атлантике	184
<i>Е. И. Серяков, А. И. Смирнова.</i> Связь составляющих теплового баланса Северной Атлантики с аномалиями температуры воды за характерные годы	193
<i>А. И. Смирнова.</i> Изменение теплосодержания деятельного слоя Северной Атлантики при разных типах атмосферной циркуляции	206
<i>И. П. Карпова.</i> О влиянии Исландского минимума атмосферного давления на течения Норвежского моря	221

#### Методы натурных исследований, приборы

<i>А. В. Проворкин, Г. Р. Рехтзамер.</i> Применение искусственных спутников Земли для океанологических исследований	230
<i>А. В. Проворкин, Г. Р. Рехтзамер.</i> О дешифрировании снимков льдов, полученных с метеорологических спутников Земли	239

### Часть вторая. ХИМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ

<i>О. А. Алекин, Н. П. Моричева.</i> Расчет насыщенности карбонатом кальция воды Черного моря	250
---	-----

## CONTENTS

### Part first. PHYSICS OF THE OCEAN AND THE ATMOSPHERE

#### Theory, experiments, methods of calculation

	Pp.
<i>V. M. Radikevich.</i> Investigation of some characteristics of interaction between the atmosphere and sea boundary layers on the base of a new theoretical model	3
<i>A. S. Baluyeva, V. N. Veretennikov.</i> On the calculation of wind-induced surge	16
<i>A. S. Baluyeva, V. N. Veretennikov.</i> On the theory of non-stationary drift currents in the ocean	23
<i>V. A. Makarov.</i> On the propagation of a long wave in a channel with the variable cross-section	30
<i>L. I. Boris.</i> Calculation of internal waves and associated currents in the ocean	33
<i>B. A. Kagan, A. V. Nekrasov, R. E. Tamsalu.</i> Calculation of tidal phenomena in the sea taking into account the lateral turbulent friction	50
<i>A. V. Nekrasov.</i> Use of the relationships between the sea-level and its slope at the tidal oscillation analysis	56
<i>A. B. Menzin.</i> Electrical analogue model of the deep circulation	64

#### Formation of real ocean and sea processes

<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;"><i>V. V. Timonov</i></span> . Centers of ocean.—atmosphere interaction	69
<i>V. M. Radikevich.</i> Main causes of variations of seasonal values of turbulent heat flux and evaporation heat loss in the North Atlantic	76
<i>I. P. Karpova.</i> On the atmosphere stability over the North Atlantic	81
<i>N. L. Kogutovskv.</i> Heat and salt exchange between the upper and deep layers in the North Atlantic	85
<i>B. I. Tjuriakov.</i> Calculated pattern of the changes of the structure of the Okhotsk Sea from season to season	94
<i>V. P. Khrol.</i> Methods of calculation of the advective variation of the thickness of the ice along the East American ice travel path	121

#### Variation of meteorological and hydrological conditions and their forecast

<i>B. B. Elekoyev.</i> Change of the planetary waves length during the transition from the zonal to meridional circulation	138
<i>A. A. Girs.</i> Use of the data of the development of the macrosynoptic processes in studying causes of background hydrosphere characteristics variations	145
<i>A. I. Savichev.</i> The forecast of the atmosphere pressure field over the North Atlantic in July	169
<i>E. I. Seryakov, V. P. Karaulovsky.</i> Calculation of variations of the month values of evaporation heat loss and the sea—air heat exchange in the North Atlantic	184
<i>E. I. Seryakov, A. I. Smirnova.</i> Relation between heat balance components and water temperature anomalies for the characteristic years in the North Atlantic	193
<i>A. I. Smirnova.</i> Variation of the active layer heat content in the North Atlantic in various types of the atmospheric circulation	206
<i>I. P. Karpova.</i> Influence of the Icelandic depression on the currents of the Norwegian Sea	221

#### Methods of natural investigations. Apparatus

<i>A. V. Provorkin, G. R. Rekhzamer.</i> Use of satellites for oceanological investigations	230
<i>A. V. Provorkin, G. R. Rekhzamer.</i> Decoding of ice photographs made by means of meteorological satellites	239

### Part second. CHEMICAL SEA-AIR INTERACTION

<i>O. A. Alekii, <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;"><i>N. P. Moricheva</i></span>.</i> Calculation of the saturation of calcium carbonate in the water of the Black Sea	250
---	-----

## ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АНАЛОГОВОЙ МОДЕЛИ ГЛУБИННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

А. Б. Мензин

Производя анализ данных океанографических наблюдений, можно получить самое общее представление о переносе глубинных вод (на пример, [1]). Однако эффект горизонтального перемешивания не позволяет получить из этих данных такие элементы установившейся циркуляции, как пограничные течения у западных берегов и планетарные круговороты в открытых частях океана [2]. На помощь приходят гидравлические [3] и математические [4] модели, дающие, несмотря на всю их условность, интересные, хотя и гипотетические схемы глубинной циркуляции.

Имеющаяся аналогия между уравнениями гидродинамической и электрической систем дает возможность для создания электрической аналоговой модели глубинной циркуляции.

Рассмотрим однородный океан постоянной глубины. Линеаризованные уравнения движения в случае установившейся циркуляции при выполнении условия гидростатики можно представить в виде:

$$-2\omega h (\cos \theta) v = -\frac{gh}{a} \frac{d\zeta}{d\varphi} - \frac{K}{\rho} u, \quad (1)$$

$$2\omega h (\cos \theta) u = -\frac{gh}{a \sin \theta} \frac{d\zeta}{d\varphi} - \frac{K}{\rho} v, \quad (2)$$

где  $u$  и  $v$  — средние по глубине составляющие скорости, положительные соответственно на юг и на восток;  $\varphi$  — долгота;  $\theta$  — дополнение до широты;  $\zeta$  — смещение свободной поверхности жидкости;  $h$  — глубина,  $K$  — коэффициент трения о дно или о слой жидкости, принятый за неподвижный;  $\omega$  — угловая скорость вращения Земли;  $a$  — радиус Земли; ось  $z$  направлена вверх.

Уравнение неразрывности записывается как

$$h \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} (u \sin \theta) + \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right] + Wa \sin \theta \equiv 0, \quad (3)$$

где  $W$  — поток вертикальной скорости, приходящийся на единицу поверхности.

Будем считать, что движение вызывается наличием источников и стоков, причем такой фактор движения, как ветер, также можно аппроксимировать в виде источников и стоков [3].

Путем несложных преобразований уравнения (1)–(3) сводятся к одному уравнению эллиптического типа

$$\frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial \theta^2} + \alpha_\varphi \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} + \alpha_\theta \frac{\partial \zeta}{\partial \theta} = \frac{Q}{K}, \quad (4)$$

где

$$\alpha_\varphi = \frac{-2\omega \rho h \sin \theta}{K} \cdot \frac{4\omega^2 \rho^2 h^2 \cos^2 \theta - K^2}{4\omega^2 \rho^2 h^2 \cos^2 \theta + K^2} + \frac{2\omega \rho h \cos^2 \theta}{K \sin \theta}, \quad (5)$$

$$\alpha_\theta = \frac{-2\omega^2 \rho^2 h^2 \sin 2\theta}{4\omega^2 \rho^2 h^2 \cos^2 \theta + K^2} + \operatorname{ctg} \theta, \quad (6)$$

$$Q = \frac{a^2}{\rho g h^2} (4\omega^2 \rho^2 h^2 \cos^2 \theta + K^2) W. \quad (7)$$

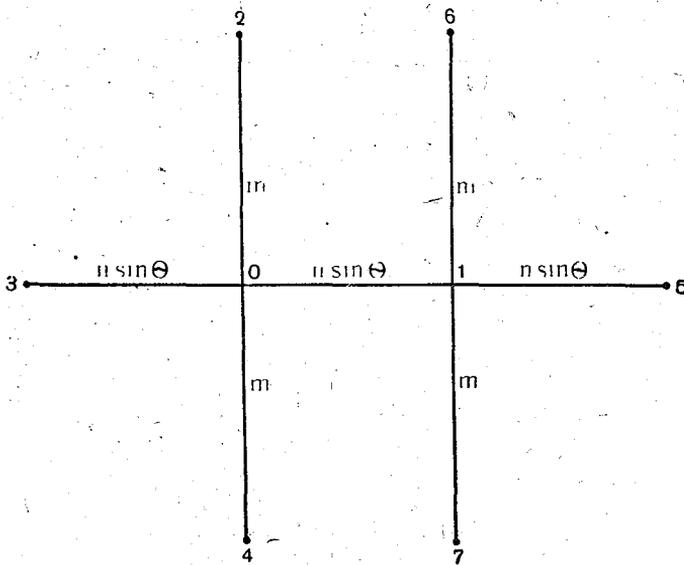


Рис. 1

Запишем уравнение (4) в конечных разностях. Его конечно-разностная форма для точки 0 (рис. 1) имеет вид

$$\left( \frac{1}{n^2 \sin^2 \theta} + \frac{\alpha_\varphi}{2n \sin \theta} \right) (\zeta_1 - \zeta_0) + \left( \frac{1}{n^2 \sin^2 \theta} - \frac{\alpha_\varphi}{2n \sin \theta} \right) (\zeta_3 - \zeta_0) + \left( \frac{1}{m^2} + \frac{\alpha_\theta}{2m} \right) (\zeta_4 - \zeta_0) + \left( \frac{1}{m^2} - \frac{\alpha_\theta}{2m} \right) (\zeta_2 - \zeta_0) = \frac{Q_0}{K}, \quad (8)$$

а для точки 1 —

$$\left( \frac{1}{n^2 \sin^2 \theta} + \frac{\alpha_\varphi}{2n \sin \theta} \right) (\zeta_5 - \zeta_1) + \left( \frac{1}{n^2 \sin^2 \theta} - \frac{\alpha_\varphi}{2n \sin \theta} \right) (\zeta_6 - \zeta_1) + \left( \frac{1}{m^2} + \frac{\alpha_\theta}{2m} \right) (\zeta_7 - \zeta_1) + \left( \frac{1}{m^2} - \frac{\alpha_\theta}{2m} \right) (\zeta_0 - \zeta_1) = \frac{Q_1}{K}, \quad (9)$$

где  $n = \Delta\varphi$ ,  $m = \Delta\theta$ .

Теперь обратимся к электрической системе. Сумма сил токов в каждом узле сетки должна быть равна нулю, т. е. для точки 0 (рис. 2)

$$\frac{V_1 - V_0}{R_{\varphi k q}} + \frac{V_3 - V_0}{R_{\varphi (k-1) q}} + \frac{V_4 - V_0}{R_{\theta k q}} + \frac{V_2 - V_0}{R_{\theta k (q-1)}} + I_0 = 0, \quad (10)$$

а для точки 1 —

$$\frac{V_5 - V_1}{R_{\varphi(k+1)q}} + \frac{V_0 - V_1}{R_{\varphi kq}} + \frac{V_7 - V_1}{R_{\theta(k+1)(q-1)}} + \frac{V_6 - V_1}{R_{\theta(k+1)(q-1)}} + I_1 = 0, \quad (11)$$

где  $V$  — потенциалы узловых точек модели;  $R$  — сопротивления;  $I$  — токи, подаваемые в узлы сетки.

Сравнивая уравнение (8) с уравнением (10), а (9) — с (11), замечаем, что в каждом случае сопротивление,  $R_{\varphi kq}$  должно быть пропорционально разным величинам. Выйти из этого положения можно, либо

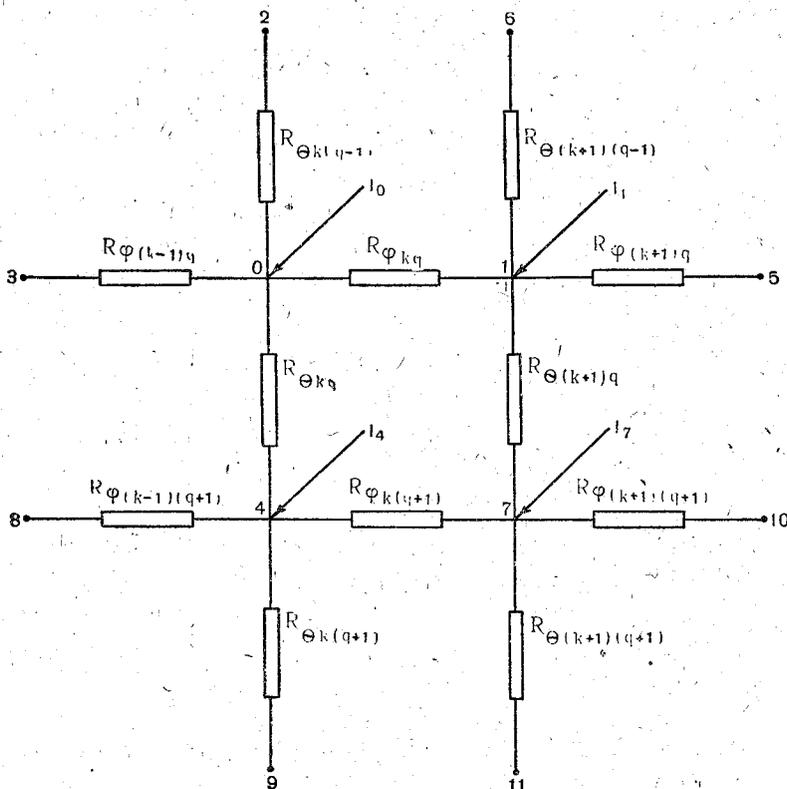


Рис. 2

применяя схемы с двумя катодными повторителями для всех плечей сетки [5], но это сильно усложняет модель, либо пересчитывая сопротивления сетки [5]. Последнее предпочтительнее, так как лишь незначительно увеличивает предварительные расчеты.

Умножаем уравнение (8) на коэффициент

$$N_{\varphi} = \frac{1}{n^2 \sin^2 \theta} - \frac{\alpha_{\varphi}}{2n \sin \theta} \cdot \frac{1}{\frac{1}{n^2 \sin^2 \theta} + \frac{\alpha_{\varphi}}{2n \sin \theta}}. \quad (12)$$

Теперь оба значения  $R_{\varphi kq}$  не отличаются друг от друга. Это умножение нужно сделать с конечно-разностными выражениями уравнения (4), составленными для всех узловых точек сетки.

Если написать конечно-разностное представление уравнения (4) для точки 4 и сравнить его с (8), то по аналогии с предыдущим легко

заметить, что для идентичности сопротивлений по оси  $\theta$  необходимо умножить уравнения для всех узловых точек еще на величины

$$N_0 = \frac{1}{\frac{1}{m^2} - \frac{\alpha_\theta}{2m}} \quad (13)$$

Правая часть (4) моделируется пропорциональным ей током, подаваемым в узлы сетки.

Таким образом, коэффициенты подобия имеют вид:

$$C_V = \frac{\zeta}{V}, \quad (14)$$

$$C_{I_{kq}} = -\frac{Q}{I} N_{\varphi q}^k \prod_{j=1}^q N_{\theta j}, \quad (15)$$

$$C_{R_{kq}} = \frac{N_{\varphi q}^{-k} \prod_{j=1}^q N_{\theta j}^{-1}}{\left(\frac{1}{n^2 \sin^2 \theta} + \frac{\alpha_\varphi}{2n \sin \theta}\right) KR_{\theta 0}} = \frac{N_{\varphi j}^{-k} \prod_{j=1}^q N_{\theta j}^{-1}}{\left(\frac{1}{m^2} + \frac{\alpha_\theta}{2m}\right) KR_{\theta 0}} \quad (16)$$

а индикатор подобия —

$$\frac{C_V}{C_{R_{kq}} C_{I_{kq}}} = 1, \quad (17)$$

где  $k$  и  $q$  — обобщенные координаты соответственно по осям  $\varphi$  и  $\theta$ .

Сопротивления  $R_{\varphi 0}$  и  $R_{\theta 0}$  связаны соотношением

$$\frac{R_{\varphi 0}}{R_{\theta 0}} = \frac{\frac{1}{m^2} + \frac{\alpha_\theta}{2m}}{\frac{1}{n^2 \sin^2 \theta} + \frac{\alpha_\varphi}{2n \sin \theta}} \quad (18)$$

Если коэффициенты  $\alpha_\varphi$  и  $\alpha_\theta$  становятся отрицательными, величины множителей (12) и (13) меняются на

$$N'_\varphi = N_\varphi^{-1}, \quad (19)$$

$$N'_\theta = N_\theta^{-1}, \quad (20)$$

а коэффициенты подобия (15) и (16) превращаются в

$$C_{I_{kq}} = -\frac{Q}{I} N_{\varphi q}^{-k} \prod_{j=1}^q N_{\theta j}^{-1}, \quad (21)$$

$$C_{R_{kq}} = \frac{N_{\varphi q}^k \prod_{j=1}^q N_{\theta j}}{\left(\frac{1}{n^2 \sin^2 \theta} - \frac{|\alpha_\varphi|}{2n \sin \theta}\right) KR_{\varphi 0}} = \frac{N_{\varphi q}^k \prod_{j=1}^q N_{\theta j}}{\left(\frac{1}{m^2} - \frac{\alpha_\theta}{2m}\right) KR_{\theta 0}} \quad (22)$$

Вид индикатора подобия остается прежним.

Следовательно, электрическая аналоговая модель глубинной циркуляции строится на основании выражений (14)—(18) и (20)—(22). При этом особое внимание нужно обращать на условие

$$\frac{1}{n^2 \sin^2 \theta} - \frac{\alpha_\varphi}{2n \sin \theta} > 0. \quad (23)$$

Невыполнение его приводит к тому, что в схеме появляются отрицательные сопротивления.

В качестве граничного условия используется условие непротекания жидкости через твердую стенку. Полезно также учесть гипотезу о наличии быстрого и узкого течения у западных берегов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. G. Wüst. Stromgeschwindigkeiten und Strommengen in den Tiefen des Atlantischen Ozeans unter besonderer Berücksichtigung des Tiefen- und Bodenwassers, «Meteor» Exped. 1925—1927, Wiss. Ergebn., Bd. 6, T. 2, Lfg., Gruyter, Berlin, 1957.
2. Г. Стоммел, А. Аронс. Абиссальная циркуляция в Мировом океане. II. Идеализированная модель циркуляции в Мировом океане. «Проблемы океанической циркуляции». М., Изд. «Мир», 1965.
3. Г. Стоммел, А. Аронс, А. Фэллер. Некоторые примеры стационарной океанической циркуляции в замкнутых бассейнах. Сб. «Проблемы океанической циркуляции». М., Изд. «Мир», 1965.
4. Г. Стоммел, А. Аронс. Абиссальная циркуляция в Мировом океане. I. Примеры стационарной циркуляции на сфере. Сб. «Проблемы океанической циркуляции». М., Изд. «Мир», 1965.
5. У. Карплюс. Моделирующие устройства для решения задач теории поля. М., ИЛ, 1962.