

В. С. БЕЛЯЕВ, член-корреспондент АН СССР А. С. МОНИН, Р. В. ОЗМИДОВ

ТЫСЯЧА СПЕКТРОВ ОКЕАНСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

На рис. 1 приведены одномерные спектральные плотности $E_i(k)$ мелкомасштабных флуктуаций (в интервале волновых чисел $k=10^{-1}-10^1$ см⁻¹) продольной скорости u , температуры T и электропроводности σ на разных глубинах в верхнем двухсотметровом слое океана, полученные на трех полигонах (№№ 5-7) 9-го рейса научно-исследовательского судна (н.и.с.) АН СССР «Академик Курчатов» в январе-феврале 1971 г. в Атлантике и на семи полигонах (№№ 2-8) 7-го рейса н.и.с. «Дмитрий Менделеев» в январе-марте 1972 г. в Индийском океане. Каждый спектр есть среднее из 5-10 спектров, вычисленных по 3-6-секундным магнитофонным записям флуктуаций на фиксированной глубине и обладавших относительно небольшим разбросом, так что на рис. 1 сведены данные около тысячи индивидуальных спектров.

Пояснения к обозначенным буквенными индексами фрагментам рис. 1 даны в табл. 1. Трехчленный индекс во второй строке таблицы указывает последовательно номер рейса, номер полигона и вид сигнала — u , T или σ (на полигоне 7.6 проводились по две серии измерений u и σ разными датчиками). В каждом столбце таблицы указаны глубины измерения (в метрах) в порядке расположения левых концов спектральных кривых сверху вниз. Для удобства сопоставлений вертикальным пунктиром на рис. 1 выделено волновое число $k=1$ см⁻¹ и горизонтальным пунктиром — стандартный уровень спектральной плотности $E_i(k)=10^{-1}$ см³·сек⁻² для u и $E_i(k)=10^{-12}$ ом⁻²·см⁻¹ для σ . Семейства спектров u и σ расположены приблизительно в порядке убывания их средних уровней.

Измерения производились в режиме буксировки заглубленных турбулиметров за движущимся судном⁽¹⁾, и частоты ω переводились в волновые числа k по формуле $k=U^{-1}\omega$, где U — скорость движения датчика относительно воды. Флуктуации u измерялись термоанемометрическими и электромагнитными датчиками, T — пленочным платиновым термометром сопротивления, σ — контактными датчиками разных конструкций.

Рис. 1 демонстрирует прежде всего разнообразие режимов турбулентности, встречающихся в верхнем слое океана. Так, на волновом числе $k=1$ см⁻¹ значения спектральных плотностей u изменяются в пределах четырех порядков: от 10^1 см³·сек⁻² (некоторые глубины на полигонах 7.3 и 9.5) до 10^{-3} см³·сек⁻² (некоторые глубины на полигонах 7.4 и 7.2). Значения спектральных плотностей σ на том же волновом числе изменяются даже в пределах пяти порядков: от нескольких единиц 10^{-11} ом⁻²·см⁻¹ на полигоне 7.8 до нескольких единиц 10^{-16} ом⁻²·см⁻¹ на полигоне 7.5.

На некоторых полигонах турбулентность приблизительно однородна по глубине (например, 7.8. u , 7.6. u , 7.2. u , 7.8. σ , 7.2. σ , 7.5. σ). На других же полигонах ее уровень изменяется по глубинам (например, на графиках 7.3. u , 9.5. u , 7.4. u , 7.4. σ эти вариации достигают двух порядков), при этом уровни турбулентности не изменяются монотонно с глубиной, т. е. в верхнем слое океана чередуются тонкие прослойки слабой и более сильной турбулентности, связанные, по-видимому, с вертикальной микроструктурой стратификации термодинамических параметров воды и скорости течений. От случая к случаю меняется и форма спектров турбулентности (ср., например, 7.3. u и 9.7. u).

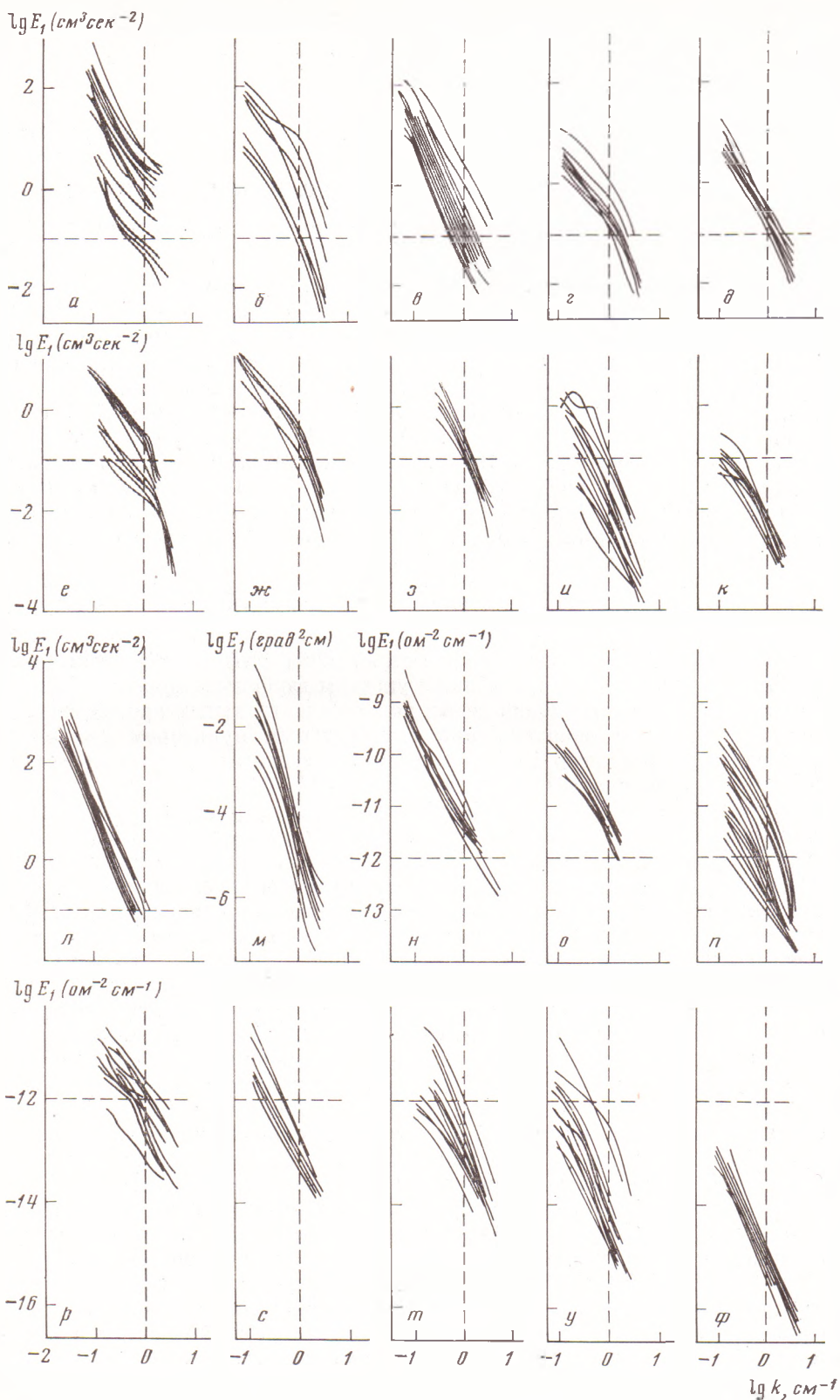


Рис. 1. Семейства спектральных кривых. Из-за большой плотности кривых некоторые из них на графиках опущены

Таблица 1

а	б	в	г	д	е	жс	з	и	к	л	м	н	о	п	р	с	т	у	ф
7.3.и	9.5.и	7.7.и	9.6.и	7.8.и	7.5.и	9.7.и	7.6(2).и	7.4.и	7.2.и	7.6(1).и	9.6.т	7.8.σ	7.6(1).σ	7.6(2).σ	7.7.σ	7.2.σ	7.4.σ	7.3.σ	7.5.σ
127	70	195	30	55	115	52	107	67	120	90	40	141	54	149	157	77	67	70	187
70	87	157	40	95	115	36	75	120	120	80	50	145	68	149	195	120	65	35	150
70	60	213	60	170	115	140	75	49	138	104	60	170	60	45	94	120	60	35	120
72	80	195	50	161	115	90	106	103	77	128	60	110	14	23	160	120	80	70	105
72	30	213	60	110	115	110	149	60	77	142	50	170	10	217	195	77	70	72	90
35	50	168	77	141	105	73	23	120	181	150	40	175	68	132	213	77	60	52	115
118	40	138	40	170	100		185	60	181	176	77	16	89	23	138	77	75	72	55
35		94	50		100		125	75	138	163	30	95		75	168		120	70	129
35		103			100		125	65		136		55		75	141		49	91	80
35		138			187		23	80		142				106	174		103	118	100
103		121			120			60						71	138		120	127	
30		77						70						71				103	
52		160												125					
91		168												125					
70		141												71					
		77												106					
		20												146					
		55												71					
		33																	

Режимы турбулентности целесообразно пытаться сопоставлять со средними гидрологическими условиями⁽²⁾, прежде всего с вертикальными градиентами скорости течения и плотности воды, а иногда, может быть (особенно для флуктуаций σ), также температуры и солености по отдельности, а затем с толщиной верхнего однородного слоя океана, количественными характеристиками слоя скачка плотности и характеристиками морского волнения во время измерений и в предшествующий период.

Гидрологические условия на указанных полигонах были следующими. На полигоне 9.5 (30° ю.ш., 46° з.д.) верхний однородный слой океана отсутствовал, флуктуации u измерялись в слое с малым градиентом плотности; градиент скорости течения имел наибольшие значения в верхней части слоя, а на глубинах ниже 60 м не превышал 0,5 (см/сек)/м. На полигоне 9.6 (23° ю.ш., 30° з.д.) измерения проводились под слоем скачка плотности, который был расположен на глубине 20 м; вектор скорости течения в слое измерений почти не изменялся по модулю и поворачивался с глубиной на угол 45° против часовой стрелки. На полигоне 9.7 (0° ш., 24° з.д.) однородный слой имел толщину 30 м, а максимальные градиенты плотности были на глубине 70–95 м; градиенты скорости течения были сравнительно малыми (их максимальные значения в слое 85–105 м около 1 (см/сек)/м).

На полигоне 7.2 (2° с.ш., 133° в.д.) измерения проводились под однородным слоем толщиной 60 м при сравнительно больших градиентах плотности; градиенты скорости течения были порядка 0,5–1,5 (см/сек)/м. На полигоне 7.3 (14° ю.ш., 120° в.д.) градиент плотности в слое измерений изменялся в небольших пределах, однородный слой практически отсутствовал, вектор скорости течения мало изменялся с глубиной. На полигоне 7.4 (0° ш., 84° в.д.) однородный слой имел толщину около 10 м и большинство измерений пришлось на слой со сравнительно большим градиентом плотности; вектор скорости течения поворачивался в слое от 50 до 125 м на угол 180° против часовой стрелки и изменялся от 45 до 20 см/сек.

На полигоне 7.5 (0° ш., 76° в.д.) однородный слой прослеживался до глубины 50 м, большинство измерений выполнено в слое скачка с большим

градиентом плотности; поле скорости течения имело сложную структуру: в слое от 50 до 150 м вектор скорости изменялся от 40 до 10 см/сек и по направлению в пределах угла 135° . На полигоне 7.6 (0° ш., 61° в.д.) однородный слой имел толщину 10 м, измерения проводились при различных градиентах плотности; поле скорости течения имело очень сложную вертикальную структуру: скорость в верхнем двухсотметровом слое изменялась от 95 до 10 см/сек, а направление — в пределах угла 190° . На полигоне 7.7 (11° с.ш., 56° в.д.) плотность воды монотонно возрастала с глубиной, скорость течения в верхнем двухсотметровом слое мало менялась с глубиной. На полигоне 7.8 (0° ш., 56° в.д.) однородного слоя практически не было, все измерения (за исключением горизонта 110 м) были выполнены при небольших значениях градиента плотности; вектор скорости течения изменялся по модулю от 55 до 25 см/сек, а по направлению — в пределах угла 60° , поворачиваясь ниже 75 м по часовой стрелке.

Сопоставление режимов турбулентности с гидрологическими условиями на полигонах выявляет тенденцию к ослаблению флуктуаций скорости с ростом среднего вертикального градиента плотности воды. Наиболее интенсивные флуктуации u наблюдались на слабо стратифицированных по плотности полигонах 7.3, 9.5 и 7.7, на которых отсутствовал слой скачка плотности (по-видимому, экранирующий нижележащие слои воды от потока вихря скорости из верхнего слоя океана и оставляющий место лишь для турбулентности локального происхождения, создаваемой сдвиговой неустойчивостью внутренних волн и явлениями микроконвекции), а самые слабые флуктуации u — на полигонах 7.2, 7.4, 7.6 с большими градиентами плотности.

Судить о флуктуациях скалярных параметров T , S , σ (S — соленость) сложнее, так как их интенсивность не обязана монотонно зависеть от их средних градиентов: полагая, например, $\sigma' \sim l' \partial \sigma / \partial z$, надо учесть, что если рост $|\partial \sigma / \partial z|$ увеличивает устойчивость стратификации плотности, то он ослабляет турбулентность (уменьшает путь перемешивания l).

При обсуждении формы спектров надо прежде всего учесть, что спектры диссипации $k^2 E_1(k)$ (которые мы не приводим из-за недостатка места) во многих случаях имеют максимумы в рассматриваемом здесь интервале волновых чисел, так что наклон кривых спектральной плотности в билогарифмическом масштабе должен быть в среднем круче $5/3$ (что свойственно инерционному интервалу спектра развитой турбулентности) и должен увеличиваться с ростом k . Это подтверждается почти всеми графиками. Энергетические спектры $k E_1(k)$ (также здесь не приводимые) в ряде случаев указывают на близость максимумов в области малых k , т. е. на малость чисел Рейнольдса турбулентности, отсутствие инерционного интервала и неуниверсальность мелкомасштабных участков спектров. Форма спектров 7.3.и, возможно, объясняется смыканием интервалов плавучести и диссипации. Наконец, надо учесть, что спектры σ в интервале диссипации не универсальны, а зависят от соотношения вкладов флуктуаций температуры и солености⁽³⁾.

Институт океанологии им. П. П. Ширшова
Академии наук СССР
Москва

Поступило
23 VIII 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ В. Т. Пака, Сборн. «Автоматизация научных исследований морей и океанов», Тр. Симпозиума, 1971, ч. 1, 1972. ² Р. В. Озмидов, Сборн. Исследования океанической турбулентности, «Наука», 1973. ³ В. С. Беляев, А. С. Монин, В. Т. Пака, Физика атмосферы и океана, т. 10, № 5 (1974).