

УДК 581.526

ПОДЛЕДНЫЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ СУТОЧНЫЕ МИГРАЦИИ
АНТАРКТИЧЕСКИХ КОПЕПОД

© 1994 г. В. Б. Цейтлин, Е. Н. Колосова, И. А. Мельников

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Поступила в редакцию 28.09.93 г.

Исследованы суточные вертикальные миграции копепод подо льдом толщиной несколько более 2 м в море Уэдделла. Толщина снежного покрова на поверхности льда составляла около 0.5 м. Средняя глубина обитания самок *Metridia gerlachei* изменяется от 53 м ночью до 175 м днем. Копеподиты V стадии *Calanoides acutus* совершают обращенные миграции с меньшим размахом – от 198 м днем до 258 м ночью. Сопоставление полученных данных с данными о миграциях *M. gerlachei* под открытой поверхностью воды показывает, что средняя глубина их обитания под открытой поверхностью на 47 м больше, чем подо льдом, а размах миграций больше на 46 м. Дневная и ночная глубины обитания этого вида не связаны непосредственно с величиной подводной облученности.

Суточные вертикальные миграции зоопланктона – явление хорошо изученное в умеренных и тропических районах океана. Значительно хуже исследовано оно в высоких широтах Арктики и Антарктики. Объясняется это не только относительно меньшим количеством данных наблюдений, но и трудностями их интерпретации. Последние особенно проявляются, когда обсуждается связь суточных миграций с освещенностью. Спубликованные данные по суточным вертикальным миграциям зоопланктона в высоких широтах были получены в акваториях, свободных ото льда и, в основном, в условиях полярного дня. Тем не менее, эти данные противоречивы. Согласно работам [1, 2], летом суточные миграции копепод отсутствуют. Исследования зоопланктона в водах центрального Арктического бассейна [3] также показали, что в условиях постоянной освещенности (полярного дня) постоянными остаются и вертикальные распределения всех возрастных стадий копепод (*Calanus hyperboreus*, *C. glacialis*, *Microcalanus pigmaeus*, *Oncaea borealis*).

Лишь у самок *C. glacialis* осенью, в период смены дня и ночи, наблюдалась слабая тенденция к суточным миграциям. Это противоречит наблюдениям Яшнова в Баренцовом и Белом морях [8], Дигби вблизи Шпицбергена [10], а также Перцов [4] в Белом море.

Насколько известно авторам, в литературе не имеется данных о суточных изменениях вертикального распределения копепод в районах Антарктики, постоянно покрытых льдом. Зимой 1992 г. в западной части моря Уэдделла на дрейфующей ледовой станции работала русско-американская экспедиция. Одной из частных задач этой экспедиции было исследование изменений вертикального распределения копепод в течение суток под мощным слоем многолетнего льда. В

этой работе излагаются результаты выполненных наблюдений.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Материалом для данного исследования послужили планктонные пробы, собранные на дрейфующей станции "Уэдделл-1" 29 - 30 марта 1992 г. в слое 0 - 300 м. Основные данные по станции:

Дата	Координаты	Глубина, м	Слой облова, м
Начало:	69°29' ю.ш.	2675	0 - 50, 50 - 100, 100 - 150
29.03.92 г.	53°26' з.д.		150 - 200, 200 - 250, 250 - 300
Окончание:	69°19' ю.ш.	2745	те же
30.03.92 г.	59°39' з.д.		

Сбор планктона производили сетью Джели с входным отверстием 37 см, диаметром фильтрующего конуса 50 см и ячеей 176 мкм через лунку, расположенную примерно в 300 км от ближайшего края ледового поля. Скорость дрейфа ледового поля, на котором располагалась станция была менее 100 м ч⁻¹ (1.3 мили/сут). Толщина льда – немного более 2 м, толщина снежного покрова на льду – около 0.5 м.

Всего выполнено 7 серий с 4-х часовыми интервалами между сериями. Продолжительность каждого лова составляла 1 - 1.2 часа. Первая и последняя серии были выполнены в 10 ч утра по местному времени. Максимальная освещенность (местный полдень) приходится на вторую серию.

Параллельно планктонным ловам в другой лунке на этой же станции были проведены суточные наблюдения за *T-S* распределением и скоростью рассеяния кинетической энергии в водном

столбе 0 - 300 м с помощью зондирующего профилографа RVSR. Всего выполнено 6 серий с 4-х часовыми интервалами. Кроме того, в течение суток измерялась интенсивность падающей на поверхность снега и отраженной от нее солнечной радиации, а также облученность на глубине 10 см под поверхностью снега. Эти данные использовались для сопоставления с результатами исследований планктона.

По окончании каждой серии ловов пробы планктона концентрировались и фиксировались 5% формалином. Идентификация видов проводилась в стационарных условиях. Ввиду малочисленности зоопланктона пробы просчитывались полностью.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В пробах встречены четыре вида копепоид: *Metridia gerlachei*, *Calanoides acutus*, *Rhincalanus gigas* и *Calanus propinquus*. Число особей последних двух видов очень невелико и исследовать изменения вертикального распределения можно только у *M. gerlachei* (298 особей, пойманных за сутки) и *C. acutus* (114). Каждый из этих видов представлен всеми возрастными стадиями. У *M. gerlachei* доминируют по численности самки (99 особей) и I копепоиды (76), у *C. acutus* — V стадия (94). Вертикальное распределение этих наиболее многочисленных групп в разное время суток показаны

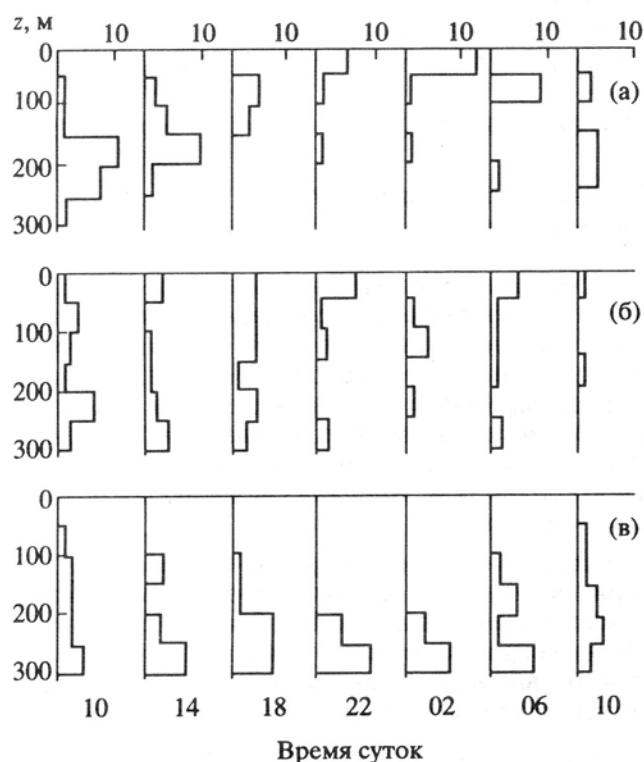


Рис. 1. Изменения вертикального распределения копепоид в течение суток: самки (а) и копепоиды I (б) *M. gerlachei*; V копепоиды *C. acutus* (в).

на рис. 1. Как видно, суточные вертикальные миграции более четко выражены у самок *M. gerlachei* и V копепоидов *C. acutus*. Что касается I-ой стадии метридий, то можно говорить лишь о наличии у них тенденции к подъему в верхние слои воды в темное время суток. Поэтому подробнее мы рассмотрим только миграции самок *M. gerlachei* и V стадии *C. acutus*.

На рис. 2 показаны суточные изменения средней глубины обитания для самок *M. gerlachei* и *C. acutus* V. Для первых она изменяется от 53 до 175 м, для вторых — от 198 до 258 м; перемещения с нижнего уровня на верхний достоверны при уровне значимости 5%. Но изменения средней глубины происходят у этих двух видов в противофазе: если метридии совершают обычные суточные миграции, т.е. в темное время суток находятся наверху, то *C. acutus* совершает инвертированные миграции, погружаясь ночью. Последний тип миграций встречается у сравнительно небольшого числа видов, представленных, как правило, малым числом особей. Наблюдаемый размах миграций у *C. acutus* безусловно занижен, так как нижняя граница погружения этих копепоид совпадает с нижним обловленным слоем (250 - 300 м) и не исключено, что часть животных опускается глубже 300 м. Изменение средней глубины нахождения со временем у обоих видов хорошо описывается функцией

$$z(t) = z + A \cos(\pi(t - t_0)/12 + \varphi), \quad (1)$$

где z — средняя глубина, относительно которой происходят колебания, м; A — амплитуда колебаний, м; t — время суток; t_0 — момент начала исследования цикла; φ — фаза. Значения параметров ($\pm$ стандартная ошибка) таковы:

	t_0	z	A	
<i>M. gerlachei</i>	10	105 ± 5	59 ± 6	-0.4 ± 0.1
<i>C. acutus</i>	10	232 ± 4	-30 ± 6	-0.6 ± 0.1

Измеренные в слое 0 - 300 м одновременно с ловами зоопланктона профили температуры, плотности и солёности воды (рис. 3) оставались практически неизменными в течение суток. Почти постоянным оставался и профиль рассеяния кинетической энергии. Миграции метридий происходили в слое, где разность между температурами на верхней и нижней границах была менее 2°C . В зоне миграций *C. acutus* эта разность не превышала 0.5°C .

Единственным фактором, существенно изменявшимся в течение суток, была величина солнечной радиации (в диапазоне 400 - 800 нм), падавшей на поверхность снега. Ее величина в 10 ч равнялась 4 Вт/м^2 , достигала максимума (около 300 Вт/м^2) в 15 - 17 ч и падала до 8 Вт/м^2 в 21 ч. Изменения облученности на глубине 10 см под поверхностью снега показаны на рис. 2. Как видно,

максимум подводной облученности совпадает с начальной стадией подъема копепода *M. gerlachei* к поверхности и погружением *C. acutus*.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Интересно сравнить описанную картину вертикальных миграций *M. gerlachei* подо льдом с миграциями этого же вида под открытой поверхностью воды. Соответствующие наблюдения были сделаны Рудяковым и Ворониной [6] в декабре в море Скотия, т.е. районе сравнительно близком к морю Уэдделла. Полученные ими результаты показаны на рис. 4, там же приведена кривая миграций *M. gerlachei* с рис. 2, смещенная для удобства сравнения по фазе, поскольку в этом случае $t_0 = 21$ ч. Изменения средней глубины обитания также можно описать с помощью функции (1) с параметрами: $z = 152 \pm 8$ м, $A = 82 \pm 12$ м и $\phi = -0.6 \pm 0.1$. Сравнивая эти величины с приведенными выше для *M. gerlachei* видим, что средняя глубина обитания этих копеподов под открытой поверхностью воды на 47 м больше, чем подо льдом, а амплитуда миграций больше на 23 м. Таким образом, нижняя глубина обитания под открытой поверхностью (234 м) оказывается на 70 м ниже, чем подо льдом (164 м).

К сожалению, в обоих исследованиях не измерялась подводная облученность. Поэтому, сопоставляя световые условия, в которых находились копеподы в том и другом случае, мы вынуждены ограничиться лишь самыми грубыми оценками. Исследования миграций подо льдом, производились поздней осенью, когда солнце поднималось менее чем на 10° над горизонтом. В таких условиях можно пренебречь выходящим из снежного слоя рассеянным светом по сравнению с отраженным от его поверхности и считать, что интенсивность радиации, проникающей в снег на глубину d (м), равна $E_s = (E_i - E_r) \exp(-k_s d)$, где E_i — интенсивность падающей на поверхность снега радиации; E_r — отраженной, а k_s — показатель ослабления света в снежном слое. Измерения показали, что при $d = 0.1$ м величина $E_s / (E_i - E_r) = 0.1$, а следовательно $k_s = 23$. Эта величина сравнима с приведенной в работе [11] для сухого снега и длины волны 470 нм — $k_s = 20$. Толщина снежного слоя, как было сказано выше, составляла около 0.5 м. При прохождении света через этот слой облученность уменьшается в 10^5 раз. Показатель ослабления для льда k_l примерно на порядок меньше, чем для снега — $k_l = 2$ [11], и облученность в двухметровом льду падает еще на порядок. Таким образом, облученность на нижней границе льда составляет 10^{-6} от ее величины непосредственно под поверхностью снега. Полагая показатель ослабления света в воде равным $k_w = 0.05$, легко найти, что такое ослабление эквивалентно прохождению радиации через слой воды толщиной 276 м. Но под открытой поверхностью воды

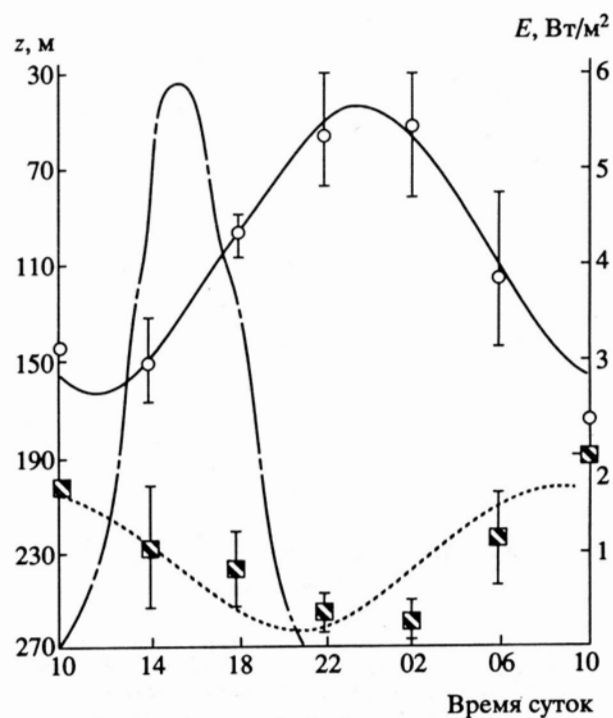


Рис. 2. Суточные изменения средней глубины обитания самок *M. gerlachei* (кружки, сплошная линия), копеподитов *V C. acutus* (темные квадраты, штриховая линия) и облученности E на глубине 10 см под поверхностью снега (штрих-пунктирная линия).

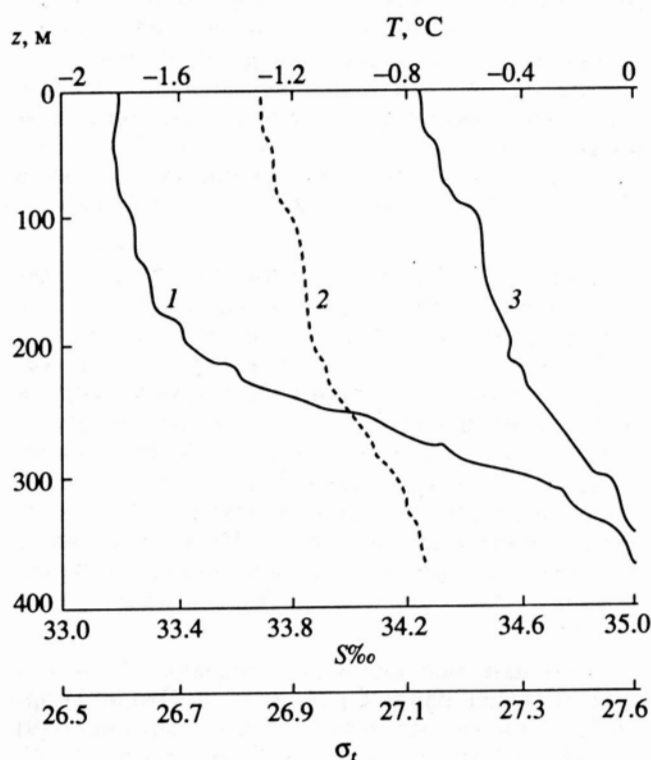


Рис. 3. Вертикальные профили температуры (T), солености (S) и плотности (σ_t).

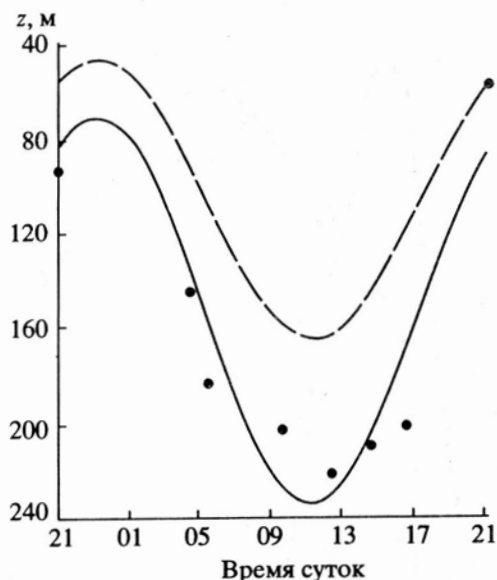


Рис. 4. Суточные изменения средней глубины обитания самок *M. gerlachei* по данным Рудякова и Ворониной [5] (темные кружки, сплошная линия) и по нашим данным (штриховая линия). Последняя для удобства сравнения смещена по фазе.

мигрирующие копеподы опускаются на глубину 234 м, где, как видно, облученность значительно выше, чем на верхней границе миграций подо льдом. Отсюда следует, что границы миграций *M. gerlachei* не связаны непосредственно с абсолютной величиной облученности и нет причин говорить о каком-либо предпочтительном ее уровне. Суточные изменения освещенности лишь синхронизируют изменения двигательной активности отдельных особей. Для такой синхронизации достаточно облученности порядка 10^{-10} - 10^{-11} Вт/м², имеющейся на нижней границе миграций.

Средняя за 12 часов скорость погружения (и подъема) составляла подо льдом 9.8 м/ч. При среднем размере самки *M. gerlachei* 3.7 мм она соответствует скорости 0.73 длины тела (д. т.) в секунду. Вычисленная таким же образом средняя скорость миграций под открытой поверхностью воды равна 13.3 м/ч или 1 д. т./с. Обе эти величины вполне отвечают данным о скорости пассивного погружения пелагических животных, равной примерно 1 д. т./с [7]. Несколько ниже оказывается скорость перемещений копепод *S. acutus* — 5 м/ч или 0.32 д. т./с (средняя длина тела 4.35 мм).

Суточные вертикальные миграции *S. acutus* исследовались ранее в районе о-ва Южная Георгия [12], южнее антарктической конвергенции [9] и в районе Антарктического полуострова [13, 14]. Харди и Гюнтер [12] рассматривали численность копепод в дневных и ночных ловах, не дифференцируя их по стадиям, и не обнаружили суточных

миграций. Не обнаружили суточных миграций у старших копеподитных стадий также авторы работ [13] и [14]. К иным выводам пришла Эндрюс [9]: V и VI стадии совершают обычные суточные миграции летом и не мигрируют зимой: что касается младших копеподитных стадий, то они, по-видимому, не мигрируют. Последний вывод был сделан по материалам двух суточных станций. О миграциях старших стадий Эндрюс судила по совокупности данных о вертикальном распределении *S. acutus* в обширной области к югу от антарктической конвергенции, разделив их на зимние и летние, а затем — на дневные и ночные. Если считать, что нигде в этой области не было в это время сезонных миграций, то такой метод анализа не вызывает возражений. Наши наблюдения совпали по времени с сезонным погружением копепод и привели к результатам, отличным от полученных в работах [9, 12 - 14]. Учитывая, что последние также не совпадают, можно лишь констатировать, что вопрос о характере суточных миграций *S. acutus* — если они есть — остается открытым.

Авторы благодарят Д. Мартинсона и А. Иванова, предоставивших полезную океанографическую информацию.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (93-04-20124).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богоров В.Г. Планктон Мирового океана // М.: Наука, 1974. 320 с.
2. Виноградов М.Е. Вертикальное распределение океанического зоопланктона // М.: Наука, 1968. 319 с.
3. Кособокова К.Н. Суточные вертикальные распределения *Calanus hyperboreus* Kroeger и *S. glacialis* Jaschnov в центральном полярном бассейне // Океанология. 1978. Т. 18. № 4. С. 722 - 728.
4. Перцова Н.М. О количественном вертикальном распределении зоопланктона в Кандакшском заливе Белого моря // Комплексные исследования природы океана. Изд. МГУ. 1971. Вып. 2.
5. Рудяков Ю.А. Динамика вертикального распределения пелагических животных // М.: Наука, 1986. 135 с.
6. Рудяков Ю.А., Воронина Н.М. Суточные вертикальные миграции *Metridia gerlachei* в море Скотия // Океанология. 1973. Т. 13. № 4. С. 512 - 514.
7. Рудяков Ю.А., Цейтлин В.Б. Скорости пассивного погружения планктонных организмов // Океанология. 1980. Т. 20. № 5. С. 931 - 936.
8. Яшинов В.А. Планктическая продуктивность северных морей СССР. М.: Изд. Моск. об-ва испытателей природы, 1940.
9. Andrews K.J.H. The distribution and life history of *Calanoides acutus* (Giesbrecht) // Discovery Rep. 1966. V. 34. P. 119 - 161.
10. Digby P.S. The vertical distribution and movement of marine plankton under midnight sun conditions in Spitzbergen // J. Animal ecology. 1961. V. 29. № 3.

11. Grenfeld T.S., Maykut G.A. The optical properties of sea ice and snow in Arctic basin // J. Glaciol. 1977. V. 18. P. 445 - 453.
12. Hardy A.G., Gunther E.R. The plankton of the South Georgia whaling grounds and adjacent waters, 1926 - 1927 // Discovery Rep. 1935. V. 11. P. 1 - 456.
13. Huntley M.E., Escritor F. Dynamics of *Calanoides acutus* (Copepoda: Calanoida) in Antarctic coastal waters // Deep-Sea Res. 1991. V. 38. № 8/9. P. 1145 - 1168.
14. Lopez M.D.G., Huntley M.E., Lovette J.T. *Calanoides acutus* in Gerlach Strait, Antarctic. 1. Distribution of late copepodite stages and reproduction during spring // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1993. V. 100. № 1/2. P. 153 - 165.

Under Ice Daily Migration of Antarctic Copepods

V. B. Tseitlin, E. N. Kolosova, I. A. Melnikov

Daily vertical migration of copepods in the ice-covered western part of the Weddell Sea has been studied. Sea ice was about 2 m thick with 0.5 m snow cover. Medium depth habitation of *Metridia gerlachei* (female) varied from 53 m at night to 175 m at day time. Copepodites V of *Calanoides acutus* performed inverted migration with lesser depth range: they migrated from 198 m at night to 258 m at day time. Data for *M. gerlachei* vertical migration in ice covered and ice free areas of the Weddell Sea were compared. It was shown that in the ice free area the medium depth of *M. gerlachei* was 47 m deeper than in the ice covered area, but the range of migration was greater - 46 m. Day and night depths of occurrence of *M. gerlachei* are not related with the levels of under-water illumination.