

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР

ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ им. А. О. КОВАЛЕВСКОГО

ISSN 0203-4646

ЭКОЛОГИЯ МОРЕЯ

1871



ИНБЮМ

32

1989

А. Ф. СИДЬКО, В. А. ВАСИЛЬЕВ
**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО
 РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХЛОРОФИЛЛА *a*
 ФИТОПЛАНКТОНА В ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ
 РАЙОНАХ ИНДИЙСКОГО ОКЕАНА**

Содержание и пространственное распределение хлорофилла *a* фитопланктона являются наиболее общими показателями фотосинтетической активности и продуктивности фитопланктона. Пространственное распределение хлорофилла фитопланктона существенно зависит от радиационного, температурного, гидрологического режимов, концентрации биогенов и других факторов [2, 3].

Настоящая статья посвящена изложению результатов изучения пространственного распределения фитопланктона экспрессными оптическими методами в тропической части Индийского океана во время 14-го рейса нис «Профессор Водяницкий».

Методика и аппаратура исследований. При определении пространственного распределения хлорофилла *a* фитопланктона использовались погружной флюориметр ПФЛ-2 [4] и дифференциальный спектрофотометр для гидрооптических исследований ДСФГ [1]. Оба прибора построены на дифференциальной двухлучевой схеме, позволяющей повысить чувствительность измерений примерно на два порядка по сравнению с серийно выпускаемыми спектрофотометрами.

Концентрация хлорофилла фитопланктона определялась по формуле

$$C_{\text{хл}} = \frac{\Delta D_{680}}{K_{680}^{\text{уд}} l}, \quad \Delta D_{680} = D_{680} - D_{750},$$

где D_{λ} — оптическая плотность взвеси водорослей; l — длина кюветы; $K_{680}^{\text{уд}}$ — удельный показатель поглощения хлорофилла *a* для $\lambda = 680$ нм.

Значение удельного показателя поглощения $K_{680}^{\text{уд}}$ (1) зависит от видового состава водорослей, размеров клеток и колониальных форм, относительного содержания хлорофилла *a* в них и др. Поэтому численные значения $K_{680}^{\text{уд}}$ хлорофилла *a* в пробах на всех полигонах уточнялись путем определения величин ΔD_{680} для пробы и концентрации хлорофилла *a* в экстракте взвеси водорослей в этой пробе. Определение концентрации хлорофилла *a* проводилось по методике ЮНЕСКО [7]. По определенным значениям ΔD_{680} и $C_{\text{хл}}^{\text{эк}}$ по формуле (1) рассчитывались значения удельного показателя поглощения хлорофилла *a* фитопланктона в пробах. Определение ΔD_{680} и $C_{\text{хл}}^{\text{эк}}$ для каждой пробы проводилось с 3—5-кратной повторностью с последующим их усреднением. Для исследованных районов удельный показатель поглощения хлорофилла *a* фитопланктона находился в интервале $60 \div 80 \text{ см}^2 \cdot \text{мг}^{-1}$. Найденные значения $K_{680}^{\text{уд}}$ использовались при определении концентрации хлорофилла *a* для районов, лежащих вблизи станций, где проводилось определение $K_{680}^{\text{уд}}$.

Ошибки определения концентрации хлорофилла *a* экспрессным безэкстрактным способом обусловлены вариациями удельного показателя поглощения хлорофилла к оптическим свойствам океанской воды. Однако в силу того, что в указанных районах диапазон изменения оптических характеристик воды (показателей поглощения, ослабления, спектральных показателей вертикального ослабления горизонтальной облученности) был невелик, ошибка определения концентрации хлорофилла *a* не превышала 10—20% и достигала 25% и более при концентрациях хлорофилла *a* $0,1 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ и менее. При низких содержаниях

хлорофилла (менее $0,05 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$) концентрация определялась стандартным экстрактым методом [7].

Методика определения пространственного распределения хлорофилла фитопланктона состоит в следующем. С помощью ПФЛ-2 снимается непрерывная кривая вертикального распределения интенсивности флуоресценции хлорофилла фитопланктона в диапазоне глубин 0—120 м и выбираются 4—5 горизонтов, достаточных для полной градуировки кривой в единицах концентрации хлорофилла. Затем отбираются пробы *in situ* с выбранных горизонтов и записываются дифференциальные спектры поглощения проб воды на спектрофотометре ДСФГ. В качестве эталонной среды используется фильтрат-вода, отфильтрованная через мембранный фильтр СЫНПОР № 4, которая берется с горизонта 100 м. Затем из полученных дифференциальных спектров поглощения определялась величина пика поглощения хлорофилла $a \Delta D_{680} = D_{680} - D_{750}$ (разность оптических плотностей, измеренных при $\lambda = 680$ и 750 нм). Концентрация хлорофилла фитопланктона $C_{\text{хл}}$ определялась по формуле (1).

В связи с тем что оптическая плотность D_{λ} в красной области спектра зависит от температуры воды [5], температура проб воды и эталонной среды выравнивалась с помощью термостата U-10 (ГДР). По полученным значениям концентраций хлорофилла a калибровалась флюорограмма вертикального распределения хлорофилла. Указанная методика позволяет надежно измерять концентрацию хлорофилла a от $0,05 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ и выше.

Пространственное распределение хлорофилла a фитопланктона. Пространственное распределение хлорофилла a фитопланктона Индийского океана исследовалось на трех полигонах, где было сделано 115 станций, отобрано и определено содержание хлорофилла a в 624 пробах, осуществлено 284 зондирования для определения вертикального распределения хлорофилла, а также 50 проб обработано путем экстрагирования пигментов водорослей для калибровки флюориметра и определения значений удельного показателя поглощения K_{880}^a в формуле (1).

Исследования, проведенные вдоль меридиана 62° в. д., показали, что поверхностное распределение концентрации хлорофилла фитопланктона (слой 0—4 м) неоднородно и имеет тенденцию к увеличению ее в южной части разреза. Так, на начальном участке разреза (2° ю. ш.) концентрация хлорофилла a составляла $0,005$, а на конечном (10° ю. ш.) — $0,07 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ (рис. 1). Анализ результатов по хлорофиллу a и гидрохимии показывает, что повышение концентрации хлорофилла a в южной части разреза было обусловлено повышенным содержанием биогенов в этом районе, что способствовало более интенсивному фотосинтезу и увеличению биомассы фитопланктона.

В поверхностном слое на 1 полигоне наблюдались низкие концентрации хлорофилла a (характерные значения $0,02$ — $0,03 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$, рис. 2, а). По распределению хлорофилла в этом слое можно выделить два района — северный (ст. 1909) и юго-западный (ст. 1902—1903), где были отмечены максимальные значения концентрации хлорофилла a — до $0,05 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$. Минимальные содержания хлорофилла a — менее $0,01 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ — обнаружены примерно на 20—25% акватории полигона. Это юго-восточная часть полигона — ст. 1945—1948 и северная — ст. 1925, 1927—1928.

На горизонте 100 м распределение хлорофилла a носило в основном схожий характер с поверхностным. Однако концентрации его в этом слое были раза в 3 больше.

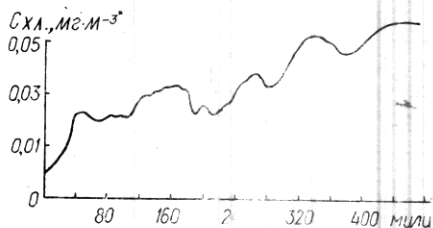


Рис. 1. Распределение концентрации хлорофилла a фитопланктона в поверхностном слое вдоль 62° в. д.

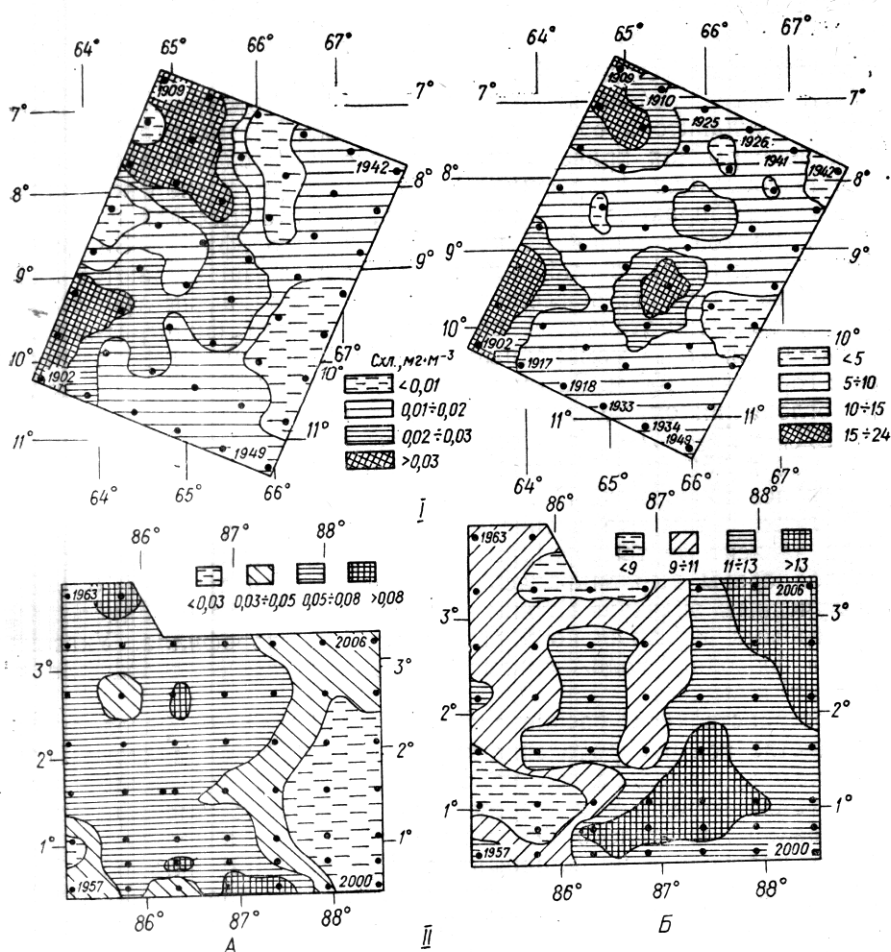


Рис. 2. Распределение хлорофилла *a* в поверхностном слое (А) и суммарное (слой 0—100 м) (Б) на I и II полигонах, на полигоне I (Б) — C_{Σ} , $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2}$

Наглядное представление о пространственном распределении суммарного хлорофилла *a* в слое 0—100 м под 1 м^2 дает карта, полученная путем обработки на машине ЕС 1010. На большей части акватории полигона наблюдались концентрации хлорофилла *a* в интервале 5—10 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2}$. Максимальное содержание хлорофилла *a* — концентрации от 15 до 25 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2}$, отмечено в трех небольших зонах — в районах станций 1902—1904, 1909 и 1930, где находилась периферия зоны дивергенции. Суммарное содержание хлорофилла *a* менее 5 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-2}$ наблюдалось в пяти небольших районах (ст. 1913, 1927, 1940, 1942 и 1946) (рис. 2, б).

На втором полигоне распределение концентраций хлорофилла *a* было более однородным, чем на первом (рис. 2, в). Из рис. 2, в видно, что поверхностное распределение хлорофилла *a* имеет крупномасштабную неоднородность. Мелкие пятна отмечены лишь у южной границы полигона и в северо-западной его части, где наблюдался выход циклонических вод. На большей части акватории полигона значения концентраций хлорофилла *a* находились в диапазоне 0,03—0,08 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$. Минимальные — менее 0,03 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$ — концентрации обнаружены только в восточной части полигона (большое пятно), а также в районе ст. 1958. Максимальное содержание хлорофилла наблюдалось в районах ст. 1964, 1977 и 1985—1986 (0,08—0,093 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$), где находились зоны конвергенции. На рис. 2, в хорошо просматривается зона минимального содержания хлорофилла *a*, которая простирается с юга на северо-восток. Это хорошо согласуется с гидрологическими данными.

Поверхностное распределение хлорофилла в слое 0—100 м (под 1 м²) также хорошо отражает сложную гидрологическую картину на полигоне (рис. 2, з). Максимальные поверхностные концентрации хлорофилла *a* (13—16 мг·м⁻²) отмечались в областях конвергенции (большая область у южной границы полигона ст. 1973, 1983, 1984, 1987—1989, 1997), где наблюдались максимальные значения содержания кислорода, а также большая зона на северо-востоке полигона (ст. 1993—1994, 2004—2006), находящаяся на разделе областей дивергенции и конвергенции. Минимальные значения содержания хлорофилла *a* отмечены на станциях 1958 (7,33 мг·м⁻²), 1969 (7,45), 1970 (7,25). На втором полигоне пространственное распределение хлорофилла *a* более полно отражает гидрологическую и гидрохимическую обстановку на полигоне [6].

Обращает на себя внимание низкое содержание хлорофилла *a* фитопланктона в поверхностных водах обоих полигонов, что указывает на то, что акватории обоих полигонов относятся к олиготворным районам Индийского океана.

Данные о вертикальной стратификации хлорофилла *a*, полученные с помощью погружаемого флуориметра, указывают на то, что максимум концентрации хлорофилла *a* на обоих полигонах залегает обычно на глубинах от 30 до 50 м. Необходимо также отметить, что вертикальное распределение хлорофилла на обоих полигонах носило одинаковый характер с явно выраженным одним глубинным максимумом (рис. 3), залегающим, как правило, в районе границы термоклина. Исключение составляет лишь ст. 2014 (последние две серии на третьем полигоне), где наблюдалось по два максимума. Концентрации хлорофилла *a* на глубинном максимуме были в 5—8 раз выше, чем в поверхностном слое. Вертикальное залегание максимума хлорофилла на полигонах представлено на рис. 4. Из рисунка видно, что залегание максимума на первых трех разрезах 1 полигона носит неоднородный характер (так, глубина залегания максимума колеблется от 25 до 70 м,

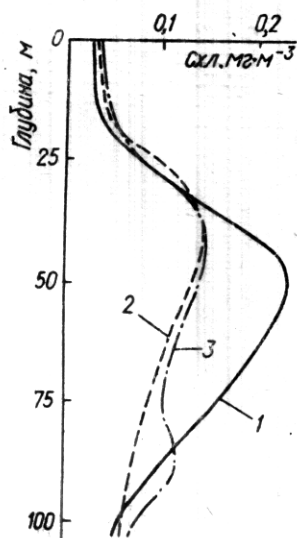


Рис. 3. Вертикальное распределение хлорофилла *a* фитопланктона:

1 — ст. 1983, 2 — ст. 1931, 3 — ст. 2014

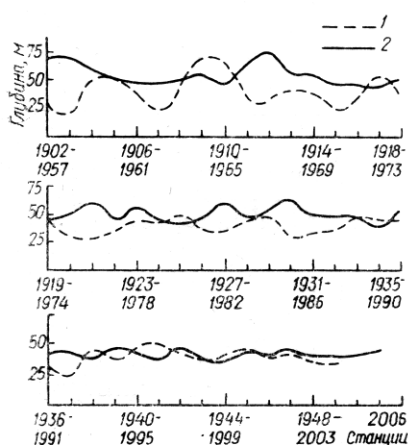


Рис. 4. Вертикальное залегание максимума хлорофилла *a* фитопланктона на 1 (1) и на 2 (2) полигонах

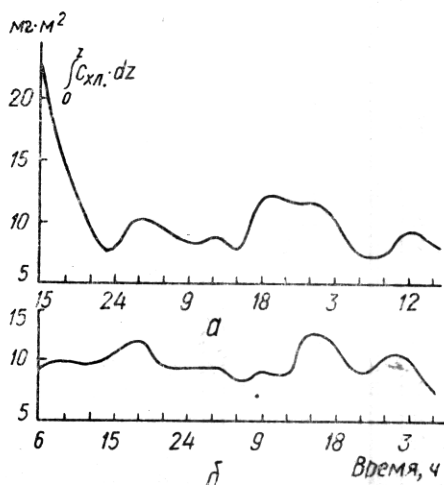


Рис. 5. Динамика изменения суммарной (в слое 0—100 м) концентрации хлорофилла *a* фитопланктона на 2-суточных станциях на 1 (а) и 2 (б) полигонах

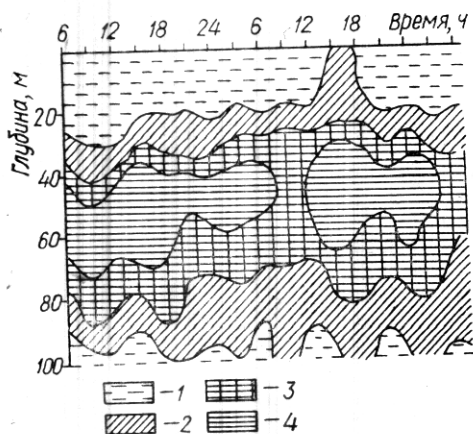


Рис. 6. Вертикальное распределение содержания хлорофилла *a* на 2-суточной станции на 2 полигоне:

1 — $< 0,05 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$, 2 — $0,05 \div 0,1$, 3 — $0,1 \div 0,15$,
4 — $0,15 \div 0,21 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$

сложной гидрологической картиной в этом районе, характеризующейся зоной раздела дивергенции и конвергенции.

Из данных, полученных на двух суточных станциях (рис. 5), видно, что суточная ритмика суммарного содержания хлорофилла *a* фитопланктона в слое 0—100 м под 1 м² прослеживается слабо, что, по-видимому, является следствием большой скорости дрейфа судна. Более наглядно она прослеживается на рис. 6, где представлено пространственное распределение хлорофилла *a* по слоям. В утренние часы происходит увеличение содержания хлорофилла *a* фитопланктона в приповерхностном слое. Максимум концентрации приходится на вечерние часы на глубинах от 40 до 70 м. Средняя величина суммарной концентрации хлорофилла фитопланктона на суточной станции была довольно низкой ($10 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2}$), за исключением первых двух серий, где она достигала $15\text{--}25 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2}$.

Выводы. Результаты исследований показали, что пространственное распределение хлорофилла *a* фитопланктона на исследованных полигонах носит сложный неоднородный характер с масштабом неоднородности порядка 40—80 миль и хорошо согласуется с гидрологической и гидрохимической обстановкой на полигонах. Наивысшие концентрации хлорофилла *a* — $0,3\text{--}0,4 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ — на 1 полигоне и $0,21 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$ — на 2 полигоне наблюдались в районах конвергенции и стыка водных масс, в этих районах отмечено повышенное содержание кислорода. Минимальные концентрации хлорофилла *a* характерны для районов дивергенции и циклонов.

Вертикальное распределение хлорофилла *a* характеризуется, как правило, одним максимумом, расположенным на глубине 30—70 м у нижней границы термоклина, горизонт залегания которого отражает гидрологическую и гидрохимическую картину, а также оптимальные условия облученности для фотосинтетической деятельности фитопланктона.

Среднее содержание суммарного хлорофилла *a* фитопланктона под 1 м² в слое 0—100 м на обоих полигонах было довольно низким — $9,5\text{--}11,0\text{--}11,5 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2}$, что характерно для открытых олиготрофных районов океана.

1. Анонасенко А. Д., Франк Н. А., Сидько Ф. Я. Спектрофотометр для гидрооптических исследований ДСФГ-2 // Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. — Новосибирск: Наука, 1979. — С. 294—297.
2. Ерлов Н. Г. Оптическая океанография / Пер. с англ. — М.: Мир, 1970. — 224 с.
3. Оптика океана / Под общ. ред. А. С. Монина. — М.: Наука, 1983. — Т. 1. Физическая оптика океана. — 370 с.

ст. 1902—1932), а на последующих разрезах (ст. 1933—1942) носит более монотонный характер с незначительным отклонением от 45 м. Неравномерное распределение слоя максимума на полигоне хорошо отражает гидрологический режим. Как правило, поднятию водных масс в зоне дивергенции соответствует поднятие слоя максимума, в районах конвергенции и стыка водных масс происходит опускание слоя максимума на глубину. Аналогичная картина наблюдалась и на 2 полигоне, где выявлены три области дивергенции и зона конвергенции. В правой части полигона вертикальное залегание максимума хлорофилла более равномерно. Это обусловлено менее

4. Франк Н. А., Сидько Ф. Я., Анонасенко А. Д., Луканев А. В. Погружные одно- и двухлучевые флюориметры ПФЛ-1 и ПФЛ-2 // Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. — Новосибирск: Наука, 1979. — С. 300—303.
5. Collins J. R. Change in the infra-red absorption spectrum of water with temperature // Phys. Rev. — 1925. — N 26. — P. 771—779.
6. Plotnikov V. A., Bulgakov N. P., Golovko V. A. Structure of hydrological fields in subequatorial region of north-eastern part of the Indian ocean // Pol. Arch. Hydrobiol. — 1985. — N 32. — P. 253—266.
7. SCOR-UNESCO. Determination of photosynthetic pigments in sea water // Monographs on Oceanographic Methodology. — Paris: UNESCO, 1966. — P. 9—18.

Ин-т биофизики СО АН СССР, Красноярск

Получено 18.06.87

A. F. SIDKO, V. A. VASILYEV

STUDY OF SPATIAL DISTRIBUTION OF CHLOROPHYLL *a* OF PHYTOPLANKTON IN EQUATORIAL REGIONS OF THE INDIAN OCEAN

Summary

Spatial distribution of chlorophyll „a“ of phytoplankton in equatorial regions of the Indian Ocean has been investigated. The average chlorophyll content under the square meter of the surface studied was 9.5-11.5 mg/m², i. e. the value characteristic of oligotrophic regions of the ocean. Vertical distribution of chlorophyll is characterized by one maximum at the depth of 30-70 m. Chlorophyll concentration in maximum layer is 5-8 times as high as on the surface. Spatial chlorophyll distribution correlates with hydrological and hydrochemical factors.

УДК 551.465.8(262.5+262.4)

В. С. ЛОГАЧЕВ, В. Е. ЗАЙКА

ВИЗУАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АГРЕГАТОВ ДЕТРИТА В ЧЕРНОМ И ЭГЕЙСКОМ МОРЯХ

Согласно последним сводкам данных о «морском снеге» [1, 2] распределение и обилие агрегатов детрита по глубинам исследовано недостаточно. Наблюдения с использованием водолазной техники ограничиваются узким приповерхностным слоем. Исследования агрегатов детрита из подводных аппаратов отрывочны.

В настоящей работе изложены результаты длительных подводных наблюдений за вертикальным распределением, размерным составом и условиями оседания агрегатов детрита в шельфовой зоне Черного моря. Описан также случай подъема к поверхности очень крупных агрегатов в Эгейском море.

Материал и методы. Наблюдения агрегатов детрита в Черном море проводили из подводной лаборатории (ПЛ) «Бентос-300» в ходе многократных и длительных погружений в разные сезоны 1982—1983 гг. на глубинах до 100 м. В летний период работы выполнялись в северо-западной части моря, в осенне-зимний — у Южного берега Крыма и у Кавказа.

Визуальная регистрация частиц выполнялась через иллюминатор диаметром 20 см при освещении двумя галлогенными лампами мощностью 1000 Вт, вынесенными на штангах на 3—4 м над рабочим иллюминатором.

Длину преобладающих по численности частиц определяли приблизительно при их нахождении вблизи иллюминатора, относя к размерным классам: около 0,5, 1—3, 3—5 мм и т. д. Регистрацию размеров выполняли обычно при «зависании» ПЛ и остановках на грунте, но изменение средних размеров частиц в пространстве отмечали также при медленном движении ПЛ.