

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ ИМ. П.П.ШИРШОВА

На правах рукописи
УДК 551.463.05

БАБОШИН ЮРИЙ БОРИСОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕТОВОГО ПОЛЯ В МОРСКОЙ ВОДЕ,
СОЗДАВАЕМОГО ЕЕ СОБСТВЕННЫМИ ЧЕРЕНКОВСКИМИ
ИСТОЧНИКАМИ

(11.00.08 - океанология)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА - 1987

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Институте океанологии им. П.П.Ширшова АН СССР.

Научные руководители: доктор технических наук,
профессор Б.Ф.Кельбалиханов
кандидат химических наук
Н.И.Попов

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Н.В.Вершинский
доктор физико-математических наук
Б.Н.Трубников

Ведущая органи

Защита диссертации
в 14⁰⁰ час. на
К.002.86.02 по при
в Институте океанологии
ИИ7218, Москва, В-

С диссертации
океанологии им.П.

Автореферат

Ученый секретарь
совета, кандида

ова

Актуальность темы. Одной из центральных проблем оптики океана является проблема изучения первичных гидрооптических характеристик, то есть оптических свойств морской воды - сложной физико-химико-биологической системы. Один из компонентов морской воды - природные радиоактивные элементы и изотопы обуславливают такое ее свойство, как самосвечение оптического диапазона. Источниками этого света являются релятивистские электроны (эффект Вавилова-Черенкова), образующиеся при распадах многих радионуклидов.

Чрезвычайно слабое самосвечение морской воды стало объектом изучения лишь в самое последнее время в связи с появлением ряда нетрадиционных для океанологии задач, успешное решение которых возможно только с помощью высокочувствительных фотодетекторов.

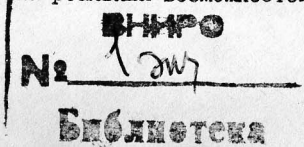
Самосвечение морской среды приходится учитывать как фон при регистрации черенковского света, генерируемого в толще океана наиболее проникающими компонентами космических лучей и продуктами их взаимодействия с ядрами атомов среды (проект ДЮМАНД).

В последние 10-15 лет широкое распространение получил метод прямого количественного анализа бета-гамма-активных радионуклидов в чистых жидкостях по черенковским вспышкам. Поскольку имеются предложения использовать этот метод для экспресс-определения в экспедиционных условиях содержания калия-40 в морской воде, следует изучить факторы, влияющие на репрезентативность данных.

Самосвечение океанской среды представляет интерес и с точки зрения фундаментальной науки. Черенковский свет в океане есть постоянный фактор, столь же неотъемлемый от морской среды, как и ее соленость. Каково значение этого фактора для океаносферы? Допустимо ли пренебрежение им при построении объективной картины взаимосвязей в мире океана? Такие вопросы не только не исследовались, но даже и не ставились.

Поэтому исследования собственного черенковского свечения морской воды как для решения прикладных задач, так и для создания единого представления о естественных световых полях в океане, приобретают большое значение.

Цели и задачи работы. Целями данной работы являются: теоретическое и экспериментальное исследование характеристик светового поля, создаваемого в морской воде ее внутренними черенковскими источниками; оценка реальных возможностей метода прямого



количественного определения содержания калия-40 в морской воде по черенковскому свечению электронов распада; исследование экологической роли черенковского света в океане.

В соответствии с целями задачи работы формулируются следующим образом:

- вычисление "яркости" распадов радиоактивных компонентов морской воды; расчет их количественного вклада в ее собственное черенковское свечение; оценка прозрачности океанских вод для черенковского света; исследование пространственных особенностей и спектральных характеристик черенковской самооблученности в океане;

- конструирование и изготовление палубного счетчика черенковских вспышек, исследование возможностей метода анализа калия-40 по черенковскому свечению электронов распада на модельных растворах и пробах природной морской воды с известным содержанием калия;

- изучение имеющихся данных о структуре и параметрах зрительных органов глубоководных животных, критический анализ существующих представлений об их визуальном мире.

Научная новизна. Впервые с достаточной полнотой рассмотрено поле стационарного черенковского света в океане, как специфическое неотъемлемое свойство морской среды. В частности, показано, что для определения показателя поглощения морской воды может быть использовано ее собственное черенковское свечение.

Подробно теоретически и экспериментально исследованы возможности метода прямого количественного анализа калия в морской воде по черенковскому излучению бета-частиц его радиоактивного изотопа. Показано, что при использовании природной морской воды в качестве рабочей среды (радиатора) черенковского счетчика, этот метод не имеет преимуществ по сравнению с альтернативными.

Впервые показано, что черенковский свет имеет биологическое значение в природной среде обитания. Обнаружено, что спектральная чувствительность глаз многих видов высокоорганизованных глубоководных животных соответствует спектральному составу черенковского света в прозрачных водах глубин. Выявлена и физически обоснована для высокоорганизованных животных принципиальная возможность зрительной локации несамосветящихся объектов в поле собственного черенковского света морской воды. Сформулирована и обоснована гипотеза об экологической роли черенковского света в океане.

Практическая ценность. Результаты проведенного исследования могут быть использованы:

- для более точных оценок оптического фона в рабочем объеме глубоководного океанского моонного и нейтринного телескопа (в оптическом варианте проекта ДЮМАНД);

- при разработке методов измерения истинного показателя поглощения света морской водой, основанных на регистрации ее собственного черенковского свечения.

Развитие в работе оригинальные представления о роли черенковского света в океане могут служить для морских биологов физическим базисом для новых, нетрадиционных подходов к проблемам в области изучения морфологии, сенсорной физиологии и экологии глубоководных животных.

Апробация работы и публикации. Результаты работы в целом и отдельные ее части докладывались автором на конференциях молодых ученых ИО АН СССР (Москва, 1984 и 1985 гг.), на Всесоюзном совещании по техническим средствам изучения океанов и морей (г. Гелленджик, 1985 г.) и коллоквиумах Лаборатории радиохимии ИОАН (в том числе и расширенном - с участием сотрудников Лаборатории прикладной гидрооптики ИОАН, Физического института АН СССР, Института Атомной Энергии, МГУ и ВНИИ ядерной геофизики и геохимии). По теме диссертации автором опубликовано 6 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитированной литературы (148 наименований). Она содержит 159 страниц машинописного текста, включая 34 рисунка и 5 таблиц.

Во введении изложена история вопроса, обоснована актуальность, сформулированы цели и задачи исследования, дано краткое описание содержания работы по главам.

В первой главе обсуждены источники черенковского света в океане, рассчитан их количественный вклад в величину собственного черенковского свечения морской воды; оценена прозрачность морской воды для черенковского света; исследованы спектральные и пространственные характеристики черенковской облученности в океане; рассмотрено соотношение интенсивностей астрономической, биолюминесцентной и черенковской компонент подводного света на различных глубинах в океане.

Во второй главе проанализированы физические характеристики зрительной системы глубоководных животных; исследована возможность использования черенковского света глубоководной фауны;

сформулирована и обоснована гипотеза об экологической роли собственного черенковского свечения морской воды.

В третьей главе обсуждены пути оптимизации параметров палубного счетчика черенковских вспышек; описана конструкция смонтированного автором счетчика, даны его технические характеристики и методика работы с ним; приведены результаты лабораторных экспериментов и оценены аналитические возможности метода.

В заключении сформулированы основные выводы.

Автор считает приятным долгом выразить благодарность своим научным руководителям к.х.н. Н.И.Попову и д.т.н., профессору Б.Г.Кельбалиханову за постановку задачи и плодотворное обсуждение всех этапов ее решения. Автор признателен также чл.-корр. АН СССР А.С.Монину, стимулировавшему экологическое направление в работе.

Автор благодарит В.А.Лирова (ИОАН) за помощь при изготовлении и отладке электронных устройств, А.Ю.Волкова (ИОАН) за содействие при проведении расчетов на ЭВМ, а также к.ф.-м.н. Д.Б.Рогозкина (МИИ), к.ф.-м.н. С.Л.Лопатникова (ВНИИЛТ) и к.ф.-м.н. В.Е.Рока (ВНИИЛТ) за многочисленные консультации и дискуссии.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I. Черенковское самосвечение морской воды

Заряженная частица, двигаясь в прозрачной диэлектрике с показателем преломления n со скоростью U , превышающей фазовую скорость света в среде c_0/n , излучает фотоны (Черенков, 1934; Тамм, Франк, 1937). Электроны, обладая малой массой покоя (0,511 МэВ), уже при малых кинетических энергиях (\mathcal{E}) движутся с релятивистскими скоростями. Для морской воды в диапазоне 300-600 нм $n^2 = 1,35$ (индекс c означает усреднение по спектру черенковского излучения) и пороговые значения U и \mathcal{E} равны $0,74 c_0$ и $0,25$ МэВ соответственно. Такая энергия сопоставима с энергиями распадов большинства присутствующих в морской воде радионуклидов. Образующиеся в результате их распадов "сверхсветовые" электроны (бета-частицы и комптон-электроны) создают в морской воде поле ее собственного черенковского свечения.

Уравнение Гершуна (закон сохранения энергии) для радионуклидов - источников черенковского света (стационарных и изотропных в среднем), равномерно распределенных в бесконечном и однородном пространстве (толще океана), записывается как:

$$\alpha^c E_0^c = \sum_j N_{ij}^c q_{ij} v_j, \quad (I)$$

где N_{ij}^c - среднее по энергетическому спектру электронов число черенковских фотонов, генерированных при i -м ядерном переходе j -го радионуклида в спектральном диапазоне $\Delta\lambda$ ("яркость" перехода); q_{ij} - вероятность этого перехода; v_j - частота распадов j -го радионуклида в единице объема морской воды в единицу времени (активность); α^c - показатель поглощения черенковского света для данного $\Delta\lambda$; E_0^c - пространственная (скалярная) облученность в диапазоне $\Delta\lambda$, создаваемая черенковскими источниками. Правая часть (I) имеет смысл плотности источников электромагнитного поля - объемной частоты рождения черенковских фотонов B_{Σ}^c .

В основной массе океанских вод B_{Σ}^c практически полностью обусловливается распадами ядер ^{40}K . Яркость их распадов N_K^c складывается из яркости за счет электронов эмиссии $N_{\beta K}^c$ и яркости за счет комптон-электронов $N_{\gamma K}^c$. Отсюда $B_{\Sigma}^c \approx B^c(^{40}\text{K}) = N_K^c \cdot v_K = (q_{\beta K} \cdot N_{\beta K}^c + q_{\gamma K} \cdot N_{\gamma K}^c) \cdot v_K = N_{\beta K}^c \cdot v_{\beta K} + N_{\gamma K}^c \cdot v_{\gamma K}$ ($v_{\beta K}$ и $v_{\gamma K}$ - бета- и гамма-активности K в водах океана).

В открытом океане содержание K варьирует примерно пропорционально солености S , значения величины которой в глубинах океана лежат в узких пределах: 34,3-34,5‰. При специальных исследованиях, проведенных недавно сотрудниками Лаборатории радиохимии ИОАН, в открытом океане не обнаружено отклонений от пропорциональности (локальных вариаций отношения K/S), превышающих 3%. Отсюда, на основании анализа всех известных определений удельных бета- и гамма-активностей элементарного калия, а также с учетом новейших данных о схеме распада ^{40}K и изотопном содержании $^{40}\text{K}/K$, полагая справедливым постулат о идентичности изотопного состава материкового и морского калия, мы оцениваем $v_{\beta K}$ в $(11,6 \pm 0,4) \beta/\text{с} \cdot \text{дм}^3$ и $v_{\gamma K}$ в $(1,37 \pm 0,04) \gamma/\text{с} \cdot \text{дм}^3$ для основной массы океанской воды ($S = 35\text{‰}$).

Яркость ядерного перехода однозначно определяется энергетическим спектром образующихся при этом электронов $N_e(\mathcal{E})$ и величиной $N_e^c(\mathcal{E})$ - полным числом фотонов, излученных электроном с начальной кинетической энергией \mathcal{E} .

Для вычисления $N_{\beta K}^c$ использовался спектр, предсказанный теорией для третьего уникального перехода ядер с низким атомным номером ($Z \ll 137$). Теоретическому спектру, подтвержденному наиболее корректными экспериментами с обогащенными препаратами K

(Копс, 1955), соответствует $\langle \xi \rangle = 0,680$ МэВ.

Погрешности при вычислении $M_e^c(\xi)$ определяются точностью описания энергетических потерь электрона малой энергии. Поэтому функция $M_e^c(\xi)$ была взята нами из работы Росса (Ross, 1970), в которой численное интегрирование уравнения Тамма-Франка, описывающего черенковское высвечивание заряженных частиц, было проведено с учетом эмпирических данных о пробеге электронов малой энергии ($\xi \leq 4$ МэВ) в водной среде.

Величина $N_{\beta K}^c$ в диапазоне 300+600 нм оказалась равной 23 фотон/β. С учетом $q_{\beta K}$ яркость распадов ^{40}K за счет электронов эмиссии составляет 21 фотон/распад.

Комптон-электроны вследствие низкой вероятности $q_{\beta K}$ дают незначительный вклад в яркость распадов ^{40}K . Так, согласно нашим вычислениям, за счет трех комптоновских рассеяний яркость распадов ^{40}K увеличивается всего на 4 фотона.

Среди остальных ~60 естественных радионуклидов, присутствующих в морской воде, лишь немногие имеют заметную (с точки зрения вклада в B_ξ^c) активность. Среди этих немногих только некоторые способны эффективно генерировать при распадах черенковские фотоны. Все они являются бета- либо бета-гамма-активными короткоживущими промежуточными продуктами распада ^{238}U и ^{232}Th . Так, в толще открытого океана заметен вклад $^{234\text{m}}\text{Pa}$ (UX_2), яркость распадов которого составляет 36 фотон/распад ($\sim 0,4\% B_\xi^c$). В придонных слоях толщиной до 200 м, где наблюдаются неравновесные (относительно ^{226}Ra) концентрации ^{222}Rn , становится существенным вклад его дочернего продукта - ^{214}Bi (RaC , 65 фотон/распад). В предельном случае, в поровых водах горячих источников, концентрации ^{222}Rn таковы (Colber et al., 1979), что $B^c(^{214}\text{Bi})$ на порядок выше, чем B_ξ^c при $S = 35\%$. Отметим, что в аномальных водах B_ξ^c растет и за счет увеличения содержания K . Например, согласно данным об элементном составе красноморских рассолов (Milvero et al., 1982), B_K в них должно быть примерно в 6 раз выше относительно морской воды средней солености.

Остальные пять собственных черенковских излучателей морской воды: ^{214}Pb (1 фотон/распад), ^{210}Bi (3 фотон/распад) из семейства ^{238}U и ^{228}Ac (10 фотон/распад), ^{212}Bi (15 фотон/распад) и ^{208}Tl (73 фотон/распад) из семейства ^{232}Th дают пренебрежимо малый (на уровне тысячных долей процента) вклад в B_ξ^c .

С учетом высокой степени однородности распределения $^{234\text{m}}\text{Pa}$ в водах океанов, можно заключить, что значительные

вариации B_ξ^c в океане могут быть вызваны изменениями концентраций только двух радиоактивных компонентов морской воды - ^{40}K и ^{222}Rn . Вдали от поверхностей раздела фаз в открытом океане такие вариации могут быть обусловлены только калем, то есть соленостью (вариации, связанные с изменениями плотности морской воды в океане, лежат в пределах точности вычислений).

Вследствие незначительности колебаний S в толще океана величина черенковской самооблученности среды практически полностью определяется показателем поглощения черенковского света. Отсюда следует, что по величине E_0^c можно судить о α^c , а с учетом спектра черенковского света - о спектре поглощения морской воды.

Основная неопределенность в имеющихся расчетных оценках возможной величины черенковского фона в эксперименте ДЖАМАНД (Geelhood, 1982; Кириленков и др., 1983) связана с неопределенностью именно α^c . В особенности неоднозначными оказываются оценки максимально возможной в толще океана черенковской самооблученности \bar{E}_0^c , поскольку в современных данных о поглощающих свойствах "чистой воды" (а именно они в большей части рассматриваемого спектрального диапазона определяют α^c наиболее прозрачных вод океана) имеются серьезные противоречия (Шифрин, 1983). Поэтому α^c для наиболее чистых вод океана, вычисленное нами по данным разных авторов, лежит в очень широких пределах: от 0,04 до 0,01 м^{-1} .

Наибольшее доверия заслуживают оценки α^c , которые лежат в области 0,03+0,04 м^{-1} . Отсюда следует, что в прозрачных и однородных водах глубин E_0^c должна достигать 800+1100 фотон/см²с в диапазоне 300+600 нм, что, с учетом спектра ее (пример которого показан на рис.1 кривой I), составляет 4 x 10⁻¹² Вт/м² (при гипотетическом пределе - ~3000 фотон/см²с или 10⁻¹¹ Вт/м²). Эта оценка подтверждается прямыми измерениями Aoki et al. (1985), проведенными на глубине 4,7 км (Гавайи) с помощью автономного заякоренного прибора. Измеренная величина фоновой облученности (площадкой E_+) оказалась равной 218⁺²⁰₋₆₀ фотон/см²с в диапазоне 420+530 нм. Авторы эксперимента полагают, что ~6% зарегистрированного света связано с биолюминесценцией. По нашему же мнению, и втрое превосходящее приведенную величину значение может быть объяснено более низким, нежели принято полагать, показателем поглощения черенковского света морской водой.

Большая часть E_0^c в океанской толще создается "далекими" распадами. Действительно, в однородной и изотропной поглощающей среде E_0^c , создаваемая изотропными равномерно распределенными

источниками, удаленными от точки наблюдения на расстояние r , определяется соотношением:

$$E_0(r) = E_0(\infty) \{1 - \exp(-\alpha^c r)\}, \quad (2)$$

где $E_0(\infty)$ для черенковских источников равна E_0^c по формуле (1). Согласно (2), распады, происходящие в сфере радиуса $\alpha^c r = 0,1$ создают в центре ее примерно 10%, $\alpha^c r = 1,0$ - 60%, $\alpha^c r = 1,6$ - 80%, $\alpha^c r = 10$ - 100% величины E_0^c . Следовательно, стационарная черенковская самооблученность есть свойство не просто морской воды, а водных масс весьма крупных объемов ($\sim 0,1 \text{ км}^3$).

Водные массы имеют специфические спектры черенковской самооблученности. За неимением классификации глубинных вод, спектры E_0^c были вычислены нами для водных масс, соответствующих типам I - III по широко используемой классификации Ерлова (1980).

В однородных по вертикали водах типа I черенковская самооблученность сравнима по величине с облученностью, создаваемой Солнцем в зените на глубине 950+1000 м, Луной в полнолуние - 550+600 м, ночным безлунным небом - 300+400 м (в зависимости от степени облачности). Таким образом, "зона черенковской освещенности" постоянно занимает не менее 3/4 объема Мирового океана.

Для полноты картины нами были оценены также величины стационарной облученности, создаваемой в океане внешними (по отношению к морской воде) источниками черенковского света. Так, облученность, создаваемая основной компонентой космических лучей на уровне моря - мюонами, невелика (максимум ее приходится на глубины 5+30 м и не превосходит 10^4 фотон/см²с) вследствие быстрого убывания потока мюонов с глубиной (использовались данные Higashi et al., 1965). Она не может конкурировать даже с облученностью, создаваемой ночным небом, полностью покрытым облаками. Единственный регион Мирового океана, где эта облученность преобладает над астрономической - это воды подо льдами в полярных областях. В работе показано, что на сколько-нибудь значительном удалении от дна рост E_0 за счет донных источников гамма-излучения наблюдаться не может. Однако в узком (~ 1 м) придонном слое незамутненных вод должно наблюдаться резкое возрастание ($\sim 10^2$) черенковской облученности (точнее, яркости черенковского фона при горизонтальном визировании).

Корректные измерения *in situ* "истинного" уровня облученности, создаваемого на различных горизонтах в толще океана за

счет спонтанного высвечивания планктонных организмов, в настоящее время отсутствуют. На основании анализа тенденций, установленных для стимулированной биолюминесценции благодаря многочисленным измерениям, проводимым с конца 50-х годов с помощью опускаемых с борта судна батифотометров различных конструкций, в том числе и новейшим исследованиям (см. напр. Aoki et al., 1985), можно утверждать следующее. В невозмущенной прибором среде спонтанное высвечивание организмов, более сложных, нежели бактерии, на километровых глубинах создает лишь спорадически возникающее световое поле, крайне неоднородное по пространству.

Обнаруженные на километровых глубинах концентрации фотобактерий (свечение которых не требует стимуляции) и поток фотонов от "средней" клетки таковы (Чумакова, Гительзон, 1975), что облученность, создаваемая ими в батипелагиали, должна была бы на 2 порядка превосходить черенковскую. Однако в той же монографии приводятся экспериментальные данные, из которых следует, что большинство известных видов фотобактерий, встречающихся в пелагиали, на километровых глубинах либо не должны светиться вовсе, либо их свечение должно быть сильно подавлено совместным действием низких температур и высоких давлений. В реферируемой работе показано, что бактериальная облученность в бати- и абиссопелагиали, быть может за редким исключением, не должна превосходить черенковскую по порядку величины (что для 4,7 км глубины подтвердил единственный пока корректный эксперимент, обсуждавшийся выше).

Биолюминесценция среды является серьезной проблемой на пути к реализации океанской программы ДЮМАНД. Ввиду того, что спектр свечения морских организмов лежит в видимой области, представляется целесообразным сдвиг чувствительности фотодетекторов в область 350+450 нм, где выход черенковского света велик, а поглощение его в наиболее чистых водах океана еще незначительно.

Глава II. Черенковский свет как физический фактор в глубоководной среде обитания

Черенковский свет существует в океанской толще со времен образования соленого океана. Поэтому естественно предположить, что черенковская "подсветка" среды используется глубоководными животными (аббревиатурой ГЖ далее мы будем обозначать рыб и головоногих, обитающих в мезо- и батипелагиали) для зрительной локализации несветящихся объектов. Действительно, если предположить,

что а) черенковский фон воспринимается ГЖ и б) его достаточно для формирования зрительных образов, видение в собственном свете морской воды, в принципе, не должно отличаться от теневого видения морских животных, обитающих в зоне низкой астрономической освещенности. Таким образом, задача сводится к доказательству предположений а) и б).

Органы зрения морских животных, и ГЖ в частности, хорошо изучены (Протасов, 1968; *Lytghoe*, 1972; *Waterman*, 1974 и др.). Поэтому к специфической зрительной системе ГЖ оказалось возможным применить общий подход, правомерный для описания любых систем, регистрирующих кванты.

Критерием работоспособности зрительной системы при $E_0 = E_0^c$ может служить соотношение между временем накопления (τ_n), в течение которого система зарегистрирует (накопит) некоторое, достаточное для надежного обнаружения (распознавания) объекта, число фотонов, и требуемым временным разрешением (τ_p), обусловленным характерными скоростями нервной и мышечной реакции организма, а также статистическими характеристиками среды его обитания. Система с известными параметрами (эффективностью регистрации фотонов \mathcal{K} ; углом поля зрения Ω , площадью входного зрачка \mathcal{G} , угловым разрешением ω , уровнем собственных шумов и т.д.) работоспособна, если τ_n , являющееся функцией E_0 , не превосходит τ_p .

С учетом того, что глаз ГЖ способен к аккомодации, сферический хрусталик глаза ГЖ создает изображения, свободные от всех видов aberrаций, а ω определяется только размерами элемента разрешения зрительного поля, анализ возможных исходов в задаче обнаружения в условиях существенных квантовых флуктуаций потока, падающего на каждый из N^2 элементов разрешения сетчатки, приводит к выражению, связывающему τ_n , параметры системы и E_0 :

$$\tau_n = 4\pi N^2 (\ln N^2 - \ln P_n) / E_0 \mathcal{K} \xi \mathcal{G} \Omega, \quad (3)$$

где ξ - коэффициент, описывающий "геометрию" глаза как фотоприемника; P_n - вероятность ошибок обнаружения (ложная тревога или искажение изображения объекта). Уравнение (3) справедливо, если расстояние между полностью поглощающим свет объектом и глазом ГЖ не превосходит $(\omega c)^{-1}$ - тогда, согласно (2) можно пренебречь фотонами, рожденными между ними. В (3) не учитываются также собственные шумы глаза пойкилотермных ГЖ - по имеющимся данным они пренебрежимо малы вследствие низких температур среды и сдвига

чувствительности в коротковолновую область.

Глаз ГЖ представляет собой идеальный природный счетчик фотонов с эффективностью регистрации в максимуме спектральной чувствительности близкой к 1 (*Denton, Warren*, 1957). Спектральная чувствительность глаза ГЖ в диапазоне 350+600 нм совпадает со спектром поглощения зрительного пигмента (рис.1, кривая 2), поскольку прозрачные ткани большинства видов ГЖ пропускают ультрафиолет вплоть до 310 нм (*Clark, Denton*, 1962). Вычисленное на основе спектров типа 1 и 2 \mathcal{K}^c глаз ГЖ для разных видов лежит в пределах от 0,75 до 0,85. Таким образом, ГЖ действительно хорошо воспринимают черенковский фон. Совпадение спектрального состава E_0^c и спектральной чувствительности глаза ГЖ не может быть случайным: в этом убеждает приспособленность ГЖ к восприятию ультрафиолета, которого нет ни в биолюминесцентном (рис.1, кривая 3), ни в астрономическом свете на больших глубинах (рис.1, кривая 4).

Полный угол зрения Ω ГЖ (не обладающих бинокулярным зрением) приближается к 2π ср. Глаз ГЖ значительно отличается от плоского фотоприемника ($\xi_+ = 1/2$) - ξ ГЖ (в особенности, обладающих афактической апертурой) близка к предельному значению, то есть к 1. При этом угловое разрешение ГЖ невелико - около 10^0 (*Nicol*, 1978). Такому ω соответствует всего $N^2 \leq 2 \times 10^2$ элементов разрешения.

Согласно (3) и приведенным оценкам параметров зрительной системы, для того, чтобы ГЖ, обладающее $\mathcal{G} = 1 \text{ см}^2$ смогло правильно ($P_n \leq 0,25$) обнаружить объект при $E_0 = E_0^c$, ему потребуется $\tau_n \geq 2$ с (при $E_0 = E_0^c$, соответственно, $\tilde{\tau}_n \geq 0,6$ с). В работе показано, что для ГЖ, обладающих бинокулярным зрением, τ_n , при прочих равных условиях, может быть снижено до 0,4 с ($\tilde{\tau}_n$ - до 0,1 с).

Согласно имеющимся данным (*Виноградов*, 1977; *Blaxter*, 1974; *Locket*, 1977) ГЖ (в особенности макропланктонным животным батипелагиали) не требуется высокого временного разрешения. Это означает, что критерий $\tau_n \leq \tau_p$ выполнен для ГЖ даже со сравнительно небольшими глазами. Таким образом, для формирования грубоконтрастных (двухградационных) крупнозернистых образов объектов для ГЖ действительно достаточно существующего черенковского фона.

Исследование (3) при фиксированных уровнях облученности (черенковской, а также квазистационарной биолюминесцентной, которая наблюдалась на километровых глубинах) и анализ литературы показали, что качество зрительных образов, формируемых зрительной системой ГЖ при $E_0 = (1+10^2)E_0^c$ лимитируется не физическими, а биологическими ограничениями (и/или биологическими потребностями).

Для ГЖ с небольшими глазами черенковская подсветка среды играет роль, в основном, в ближнем поле зрения. Однако в океане обитают ГЖ и с экзотически большими глазами. Так, имеется сообщение о гигантском кальмаре с диаметром глаз 37 см. Поток черенковских фотонов, регистрируемый сетчаткой такого глаза, составляет не менее $10^5 + 10^6$ фотон/с. При этом становится возможным формирование полутонковых изображений (при $N^2 \sim 10^2$) или улучшение пространственного разрешения примерно до 1° . Для ГЖ с такими глазами ($G \sim 10^3 \text{ см}^2$) реально обнаружение объектов размером 3+6 м на расстояниях $\sim 2\text{Э}(\text{Э} - \text{показатель ослабления узкого пучка черенковского света})$, то есть, по крайней мере, на дистанциях до 700 м.

Таким образом, благодаря черенковскому фону, для животных с развитыми глазами афотической зоны в океане не существует - на всех глубинах они обитают в сумеречной зоне. Мы полагаем, что многие виды стенобатных батипелагических животных сохранили в процессе эволюции развитые органы зрения именно вследствие наличия черенковской самооблученности среды, благодаря которой зрительный сенсорный канал используется ими постоянно и эффективно. Эта гипотеза прямо следует из принципа экономии энергетических затрат, согласно которому адаптация к глубоководным условиям, в частности, сопровождается редукцией "ненагруженных" органов чувств. В пользу гипотезы говорят многие соображения и факты, приведенные в работе. Добавим, что наши рассуждения заведомо справедливы и для животных макробентоса с развитыми глазами.

Глава III. Изучение реальных возможностей прямого количественного анализа калия-40 в морской воде по черенковским вспышкам

Преимущества регистрации распадов ^{40}K по черенковскому излучению его бета-частиц в чистых нецинтиллирующих жидкостях очевидны. Для оценки перспективности метода счета черенковских вспышек как инструмента количественного анализа ^{40}K в морской воде (предложено Саложниковым, Меркушовым, Мурзиным (1963)) автором был сконструирован, смонтирован и отлажен макет счетчика. Счетчик черенковских вспышек решено было изготовить в палубном варианте: в этом случае возможно гарантированное подавление биологической флуоресценции в пробах (путем фильтрации их, стерилизации и т.д.). Схема прибора была обычной: включенные в совпадения 197-49Б, обладающие одноэлектронной характеристикой и высокой чувствительностью, "просматривали" кваисферический объем счетной камеры

со светоотражающими стенками. Питание ФЭУ осуществлялось через делители, исключающие влияние магнитного поля Земли на работу прибора. Для минимизации вклада мюонов в общий счет в полной конфигурации счетчика (см. рис. 2) предусматривалось сложение сигналов ФЭУ с последующей дискриминацией по верхнему порогу (нижний был нулевым, поскольку амплитуда шумовых импульсов ФЭУ-49Б в одноэлектронной области превосходит амплитуду черенковских вспышек ^{40}K).

С целью определения оптимальных параметров прибора были рассчитаны теоретические зависимости эффективности регистрации распадов ^{40}K от чувствительности ФЭУ, показателя поглощения морской воды, коэффициента отражения стенок и величины объема камеры. Оказалось, что при больших объемах проб (> 10 л) возникает неопределенность ($> 2\%$) эффективности регистрации, связанная с обсуждавшейся выше неоднозначностью поглощения в очень чистых океанских водах, что может проявиться в экспедиционных условиях. Отсюда следует, что черенковский счетчик большого объема, в котором в качестве радиатора используется морская вода, имеет существенный недостаток. Он представляет собой прибор с переменной, нестабильной во времени ("самопросветление" проб) и, самое главное, плохо поддающейся контролю эффективностью регистрации распадов.

Устранить влияние вариаций свойств радиатора можно уменьшив объем проб. Так, для того, чтобы перестала проявляться разница в поглощающих свойствах вод открытого океана, необходимо уменьшить объем камеры до 4+5 л, а, с учетом возможности работы в прибрежных акваториях, - до 1+2 л. Понятно, что при этом черенковский счетчик теряет свое преимущество в скорости счета по сравнению с бета-радиометром с пластическим сцинтиллятором с развитой поверхностью (Дегтерев, Филиппов, 1982).

При лабораторных испытаниях счетчика эффективность регистрации распадов ^{40}K , измеренная по модельным калибровочным растворам неорганических солей в дистиллированной воде, оказалась равной 7,8% в области концентраций K , соответствующих океанским (скорость счета составляла $\sim 50 \text{ с}^{-1}$ при шумах $\sim 120 \text{ с}^{-1}$). Измерения содержания ^{40}K в пробах реальной морской воды с известной концентрацией K (фонд лаборатории радиохимии ИОАН) показали неплохую воспроизводимость результатов - не хуже 3% (что, однако, не перебивает возможностей гамма-спектрометрии).

При реализации прибора с лучшими техническими характеристиками (за счет иной обработки сигналов, использования менее шумящих экземпляров ФЭУ-49Б с лучшей чувствительностью, других,

более подходящих типов ФЭУ или иных типов фотодетекторов) точность может быть увеличена. При этом, однако, объемы проб должны быть малыми. Отметим также, что уменьшение объема не устраняет трудности, связанные с трансформациями спектра черенковского света за счет флуоресценции растворенных в морской воде органических веществ (которые, возможно, сцинтиллируют).

Таким образом, черенковский метод, несмотря на его привлекательность, вряд ли сможет успешно применяться для количественного анализа ^{40}K в морской воде, поскольку ограничения, налагаемые физическими свойствами радиатора, лишают его преимуществ по сравнению с альтернативными прямыми методами. Нам представляется более целесообразным применение приборов подобного типа для решения "обратной" задачи - изучения поглощения света в морской воде по ее собственному черенковскому свечению (при этом, однако, следует изучить вопрос о трансформациях его спектра).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Природными радиоактивными компонентами морской воды в океане создается стационарное поле черенковского света, обнаружимое современными фотоприемниками. В основной массе океанских вод главным источником этого света являются ядра ^{40}K , вследствие чего объемная частота рождения черенковских фотонов в целом обуславливается их концентрацией, а вариации ее с точностью до 3% следуют за колебаниями солености. Вторым по значимости собственным черенковским излучателем морской воды - $^{234\text{m}}\text{Pa}$ обеспечивается в толще океана лишь $\sim 0,4\%$ этой частоты. В придонных слоях толщиной до 200 м важным черенковским излучателем является ^{214}Bi , промежуточный продукт распада ^{222}Rn . При высоких концентрациях неравновесного ^{222}Rn вклад ^{214}Bi становится сопоставимым с вкладом $^{234\text{m}}\text{Pa}$ и, возможно, ^{40}K . Остальные радиоактивные компоненты морской воды дают пренебрежимо малый вклад в ее собственное черенковское свечение.

2. Черенковская самооблученность среды в толще открытого океана практически полностью обусловлена оптическими свойствами морской воды. Наиболее достоверным оценкам прозрачности глубинных вод отвечает уровень пространственной облученности примерно $1000 \text{ фотон/см}^2\text{с}$ в диапазоне 300-600 нм. При минимально возможной облученности поверхности океана черенковская самооблученность преобладает над астрономической в водах типа I по Ерлову

начиная с глубины ~ 300 м, при максимально возможной - с глубины ~ 1000 м. Данные о поглощении света в глубинных водах дают основание полагать, что предельный уровень черенковской самооблученности может достичь $\sim 3000 \text{ фотон/см}^2\text{с}$ ($\sim 10^{-11} \text{ Вт/м}^2$).

Поглощающие свойства морской воды могут изучаться по величине и спектральному составу черенковской самооблученности.

3. Оптические свойства морской воды, используемой в качестве рабочей среды черенковского счетчика для прямого определения содержания ^{40}K , ограничивают возможности черенковского метода. С точки зрения количественного анализа этот метод не дает преимуществ по сравнению с альтернативными. Однако черенковские счетчики могут оказаться эффективным средством определения показателя поглощения света в наиболее прозрачных водах океана.

4. Величина черенковской самооблученности и устройство глаз глубоководных животных позволяют им обнаруживать даже весьма удаленные несветящиеся объекты при полном отсутствии астрономического и биолюминесцентного света. Поэтому для животных с развитыми глазами афотической зоны в океане не существует - на всех глубинах они обитают в сумеречной зоне. Наличие черенковской самооблученности среды, по всей видимости, явилось основным физическим фактором, благодаря которому многие глубоководные виды сохранили в процессе эволюции развитые органы зрения.

Публикации

1. Черенковское излучение в океане. - В сб.: Актуальные проблемы океанологии. М.: изд. ИОАН, 1984, с.28-32.

2. К оценке интенсивности собственного черенковского свечения морской воды. - Ин-т океанологии АН СССР. М.: Деп. ВИНТИ 24.07.1985, № 5379-85, 19 с.

3. Оптимизация параметров палубного счетчика вспышек собственного черенковского свечения морской воды. - Ин-т океанологии АН СССР. М.: Деп. ВИНТИ 24.07.1985, № 5378-85, 13 с.

4. Установка для изучения черенковской светимости морской воды. - Всес. совещание по техн. средствам и методам изучения океанов и морей (тезисы докладов). М.: изд. ИОАН, 1985, с.24.

5. Информативная значимость собственного черенковского свечения морской воды для глубоководных животных. - Докл. АН СССР, 1986, т.290, №4, с.991-994 (совместно с С.Л.Лопатниковым и Н.И.Поповым).

6. Об учете малых компонентов черенковского фона морской воды при эксперименте ДЮМАНД (совместно с Н.И.Поповым представлено на III Всес. съезд океанологов, 1987).

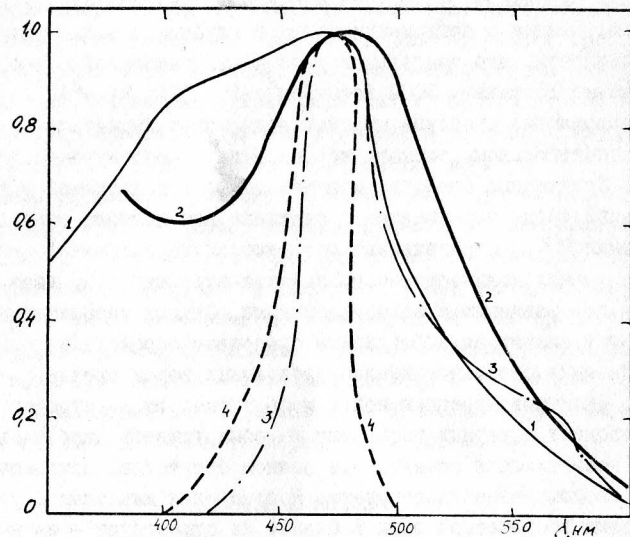


Рис.1 Сравнение спектральной чувствительности глаз глубоководных животных со спектральным составом подводного света различного происхождения: 1 - спектр черенковской самооблученности морской среды, 2 - пример спектра поглощения родопсина глубоководного животного (Munz F.W., 1958), 4 и 3 - спектр солнечного света на глубине 500 м и типичный спектр свечения морских организмов (Munz W.R.A., 1976)

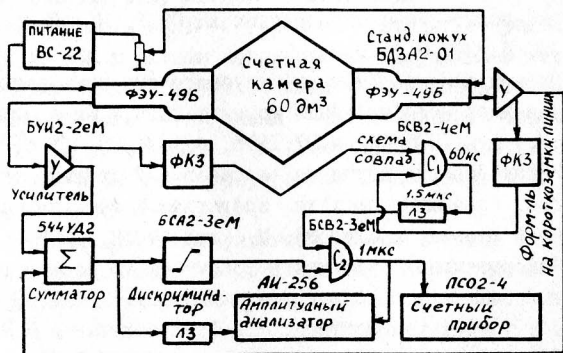


Рис.2 Блок-схема палубного счетчика вспышек собственного черенковского свечения морской воды

Н.В.Васильев

60x90/16
Печ.л.1,0.

Т-05106. Подписано к печати 24.04.1987 г.
Зак.№ 64. Тираж 100.

Институт океанологии им.П.П.Ширшова Академии наук СССР
Москва, ул.Красикова, дом 23.