

УДК 582.276:591.148:574.52 (262.5)

## МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ РАЗНООБРАЗИЯ ДИНОФЛАГЕЛЛЯТ И ПОЛЯ БИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ У БЕРЕГОВ СЕВАСТОПОЛЯ

Брянцева Ю. В.<sup>1</sup>, Серикова И. М.<sup>1</sup>, Суслин В. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского, Севастополь, brekall5@gmail.com, irasimwin@gmail.com

<sup>2</sup>Морской гидрофизический институт, Севастополь

На примере четырехлетнего мониторинга в прибрежье Севастополя подтверждена сопряженность вертикальной структуры поля биолюминесценции, обусловленная биомассой светящихся динофлагеллят с термохалинной структурой вод. Максимумы развития светящихся динофлагеллят наблюдались в весенний и осенний периоды, преимущественно в верхнем квазигомогенном слое. В период стагнации у поверхности (летом) развитие продолжается под термоклином, а в зимний – их слои равномерно распределены во всей 60-ти метровой толще воды. Температурные аномалии поверхности моря в исследованные годы определяли особенности динамики всех исследуемых параметров. После абсолютно максимального уровня количественного и качественного развития динофлагеллят в условиях аномально высокой температуры воды в 2010 году наступила тенденция спада развития в 2012 году, который характеризовался минимальной среднемесячной температурой в зимний период. Максимально быстрый прогрев в мае и аномально низкая температура в сентябре и октябре 2013 года обусловили максимальную амплитуду колебания в количестве видов динофлагеллят и второй (после 2010 года) мощный весенний «всплеск» развития светящихся динофлагеллят и поля биолюминесценции. Получена обратная связь между видовым богатством и выравненностью в сообществе по численности. Так, наиболее равномерным сообществом динофлагеллят было в самый холодный период (зима 2012 года) с минимальным уровнем развития светящихся видов.

*Ключевые слова:* поле биолюминесценции, светящиеся динофлагелляты, биомасса, температура поверхности моря, Черное море.

### ВВЕДЕНИЕ

Регистрация поля биолюминесценции является наиболее оперативным способом оценки биомассы светящихся динофлагеллят и особенностей ее вертикального мелкомасштабного распределения, связь между которыми была показана в [1]. Благодаря этому появилась возможность проводить более детальные исследования пространственной неоднородности распределения динофлагеллят, что в настоящее время проблематично из-за значительной трудоемкости обработки проб традиционными гидробиологическими методами. Динофлагелляты являются второй по значимости (после диатомовых) группой морского фитопланктона.

Имея возможность оперативного слежения с помощью биофизических методов, мы можем оценить изменчивость их основных структурных характеристик в условиях изменяющихся факторов среды. В связи с установленным фактом потепления верхнего слоя Черного моря на 1–2 °С за последние десятилетия [2], что согласуется с общими оценками глобального потепления верхнего слоя океана, особенно важной является оценка отклика биотических систем на эти климатические изменения.

Целью наших исследований было: на основании данных регулярного мониторинга изучить особенности динамики видового разнообразия и количественных характеристик динофлагеллят, а также параметров поля биолюминесценции в связи с климатическими изменениями на примере прибрежья Севастополя.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Пробы воды отбирали в ночное время суток 5-и литровым батометром с приповерхностного горизонта и с горизонта максимальной интенсивности биолюминесценции на стандартной станции (44°38'N; 33°27'E), расположенной в 2-х милях от берега. Сгущали методом обратной фильтрации через трековые мембраны с диаметром пор 1 мкм, производства г. Дубна (Россия). Подсчет клеток из полученного концентрата проводили в камере объемом 0,1 мл (мелкие) и 0,37 мл (остальные) под световым микроскопом при увеличении в 200–400 раз.

Рассчитывали следующие параметры фитопланктона: численность, биомассу, объем клеток, видовое разнообразие (индекс Шеннона-Уиверра), выравненность (равномерность) в сообществе

динофлагеллят и видовое богатство (количество видов), как светящихся, так и не светящихся форм. Подробное описание методики обработки проб и расчета основных параметров фитопланктона с помощью специальных программ описана в [3, 4]

Одновременно проводилась регистрация поля биолюминесценции, температуры и солености с помощью зондирующего комплекса «Сальпа-М» [5]. В результате обработки сигналов датчиков получали профили биолюминесценции, температуры, солености, а также рассчитанной по этим параметрам условной плотности воды с осредненными показаниями по глубине через каждый метр в диапазоне глубин от 0 до 60 м.

Также привлекались данные спутниковых наблюдений (с двух спутников Aqua & Terra) температуры поверхности моря (ТПМ) в районе исследований. По ним рассчитывались среднемесячные значения ТПМ для всего периода наблюдений, которые анализировались в сопоставлении со средней сезонной изменчивостью, полученной усреднением среднемесячных величин за период с 2009 по 2013 гг.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов ежемесячных наблюдений вертикального распределения поля биолюминесценции и термохалинной структуры на протяжении четырех лет (с 2010 по 2013 гг.) выявил их четкую сопряженность с сезонным ходом ТПМ. Каждому из сезонов соответствовал свой тип вертикального распределения поля биолюминесценции [3]. Так, на протяжении всего периода исследований в весенний и осенний сезоны развитие слоев динофлагеллят наблюдалось преимущественно в верхнем квазиоднородном слое (ВКС), в летний – под термоклином, а в зимний – равномерно в слое 0–60 м.

Летом при устойчивой стратификации вод под термоклином сохраняются гидрологические условия, характерные для зимнего периода, соответственно, в этих условиях продолжают развиваться «зимние» крупноклеточные виды, в то время как у поверхности преобладают мелкоклеточные формы, биомасса которых существенно ниже. Поэтому в приповерхностном слое отмечается тенденция спада в сезонном ходе биомассы светящихся водорослей и интенсивности биолюминесценции (ИБ) (рис. 1).

Сопоставление сезонного хода ИБ (BL) и биомассы светящихся динофлагеллят (B) со среднемесячной ТПМ (T) показало, что их максимумы приходятся на весенний и осенний периоды. При этом весенний максимум может регистрироваться либо в мае, либо в июне, а осенний – в октябре или ноябре, но в 2013 году он наблюдался в декабре. Такие сдвиги могут быть обусловлены климатической изменчивостью, поскольку в предшествующие три месяца наблюдалась аномально низкая температура воды, что, вероятно, и привело к смещению осеннего максимума на более поздний срок.

Весенний период характеризуется массовым развитием мелкоклеточных представителей светящихся динофлагеллят: виды рода *Gonyaulax* Diesing, а также виды *Scrippsiella trochoidea* (Stein, 1883) Balech ex Loeblich II и *Lingulodinium polyedrum* (Stein, 1883) Dodge. Образование слоев повышенной интенсивности биолюминесценции начинается с началом прогрева вод у поверхности. По мере увеличения толщины прогретого слоя в нем формируется серия слоев повышенной светимости. «Вспышки» развития этих видов приводят к значительному увеличению суммарной биомассы, особенно выраженное в 2010 году, когда наблюдали абсолютный за 4 года максимум биомассы светящихся динофлагеллят, и соответственно, интенсивности биолюминесценции. При этом, средний объем клеток светящихся снижается до минимума в году [3]. В это время происходит увеличение видового богатства, которое достигает своего первого максимума в мае (рис. 1).

В осенний период «размывание» сезонного термоклина обуславливает приток биогенов в верхние слои и наступает четвертый период в развитии фитопланктонного сообщества [3]. Поле биолюминесценции в ВКС может достигать максимальных величин в годичном цикле. При этом, оно может быть обусловлено, как интенсивным развитием мелкоклеточных форм, например, как *L. polyedrum* (как в октябре 2009 года) [6], так и обилием относительно более крупных клеток,

например вида *Neoceratium furca* (Ehrenberg) F. Gomes D. Moreira & Lopes-Garcia (как это было в октябре 2011 года).

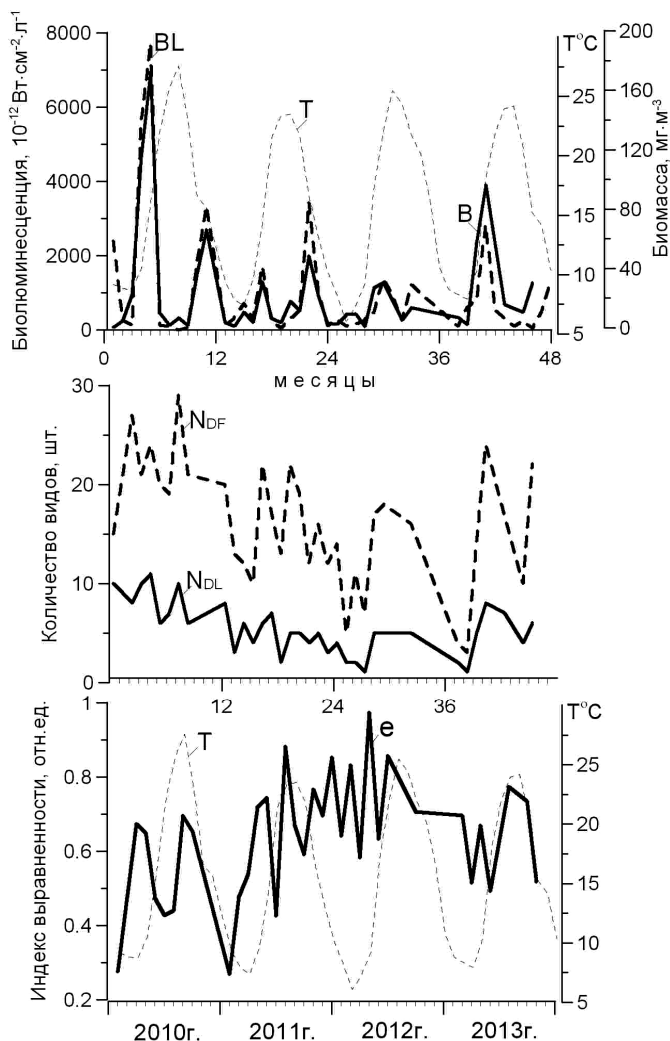


Рис. 1. Динамика интенсивности биолюминесценции (BL), биомассы светящихся динофлагеллят (B), видового богатства светящихся ( $N_{DL}$ ) и не светящихся динофлагеллят ( $N_{DF}$ ), а также индекса выравненности в сообществе всех динофлагеллят (e) на фоне изменчивости температуры (T) в приповерхностном слое у берегов Севастополя в период 2010–2013 гг.

Сезонная динамика параметров поля биолюминесценции и биомассы светящихся динофлагеллят имела сходные тенденции на протяжении всего периода исследований. Так, в 2010 году, который отличался наиболее высокой температурой поверхностных вод, как в зимний, так и летний периоды, количественные характеристики динофлагеллят и поля биолюминесценции, а также их максимальные значения существенно превосходили таковые в 2012 году, который отличался низкой температурой в зимний период. Аномально низкий температурный режим также отрицательно повлиял на количество видов как светящихся, так и несветящихся динофлагеллят. В то же время отмечена обратная связь с видовым разнообразием динофлагеллят, выраженное индексом выравненности в сообществе по численности (e) (рис. 1).

Сопряженность параметров поля биолюминесценции с количественными характеристиками динофлагеллят подтверждается высокими значениями коэффициентов корреляции между ними. Так за 4-х летний период исследований величина выборочного коэффициента корреляции между интенсивностью биолюминесценции и биомассой светящихся динофлагеллят составила 0,91. Этот

коэффициент значимо отличается от нуля при любом уровне значимости. Его доверительные границы при  $\alpha = 0,05$  имеют пределы  $[0,80 \div 0,95]$ .

В уравнениях регрессии, полученных за 4-х летний период мониторинга, значения коэффициентов регрессии близки к полученным ранее [3] за 2-х летний период наблюдений (рис. 2). Величины свободных членов в уравнениях регрессии, как и в предшествующие годы, значимо не отличались от нуля. Таким образом, по известным значениям одного из параметров можно прогнозировать другой с высокой степенью точности. Доверительный интервал для уравнений регрессии на рисунке указан пунктирными линиями.

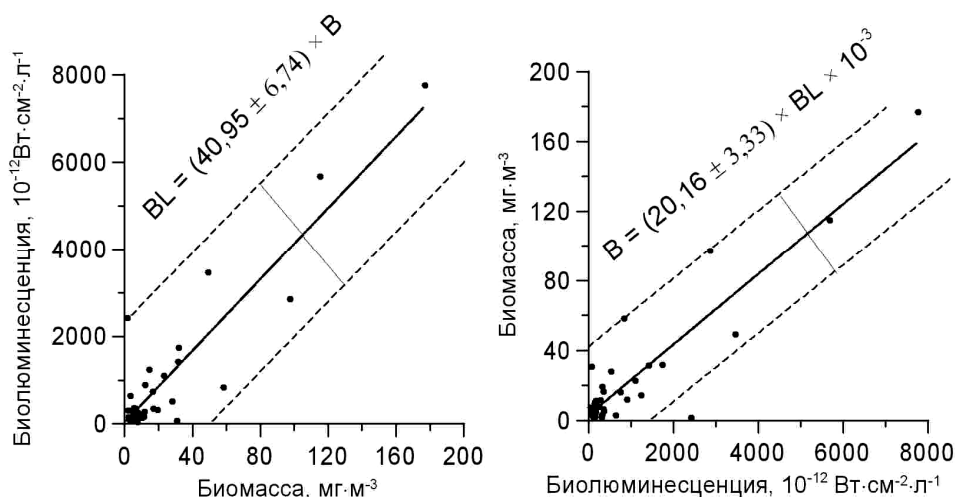


Рис. 2. Регрессионные зависимости между биомассой светящихся водорослей и интенсивностью биолюминесценции в приповерхностном слое вод в прибрежье Севастополя

Для выявления отклика сообщества на аномалии сезонной изменчивости ТПМ были рассчитаны отклонения среднемесячной ТПМ от усредненных величин за 5-ти летний период – ( $\Delta T$ ). Эти отклонения оценивались путем их сопоставления с доверительными интервалами, рассчитанными для усредненной кривой при  $\alpha = 0,05$  (рис. 3)

Наиболее значительные величины отклонений  $\Delta T$ , превышающие доверительные интервалы, наблюдались в августе 2010 года (в сторону превышения температуры над средним уровнем), в феврале 2012 г. (в сторону снижения), в мае 2012 года (в сторону превышения) а также в сентябре-октябре 2013 года (в сторону снижения). Зарегистрированное в эти месяцы поле биолюминесценции имело минимальную интенсивность не только в поверхностном слое и ВКС, но и во всем слое 0–60 м, что не являлось характерным для этих периодов года.

Максимальная величина отклонения от средней ТПМ за 4-летний период, составляющая  $\Delta T = 3$  °С, зарегистрирована в августе 2010 года, при этом наблюдался самый низкий уровень развития динофитовых водорослей и абсолютный минимум ИБ в верхнем 60-метровом слое. Аномально высокая температура у поверхности и в ВКС способствовало развитию термоклина с резкими градиентами ( $dT/dZ = 1,4$  градус/м), блокирующего обменные процессы между слоями. Летняя стагнация фитопланктона, обычная для этого времени года в ВКС, захватила и нижние слои, в результате чего поле биолюминесценции практически отсутствовало во всем диапазоне глубин. Резкое снижение развития динофлагеллят под ВКС в августе, вероятно, связано и с биологическими причинами – естественным «затуханием» после мощной «вспышки» в июле вследствие истощения питательных веществ и выедания зоопланктоном.

Однако, в целом, наиболее теплый 2010 год характеризовался максимально высокими количественными показателями водорослей, а также наибольшей средней ИБ. Следует отметить, что в течение практически всего года, за исключением октября, наблюдались положительные отклонения ТПМ от среднего уровня.

В 2012 году отрицательные аномалии температуры воды в зимний период, когда ТПМ достигла нижнего предела за весь период исследований (в феврале  $T_{\text{сред}} = 6,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), сменились положительными отклонениями в мае (рис. 3).

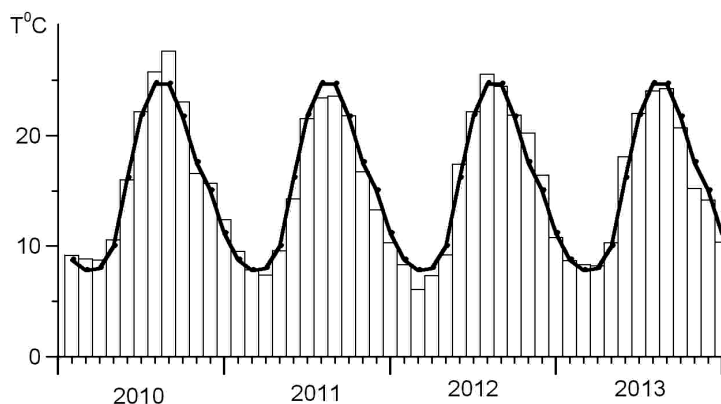


Рис. 3. Среднемесячные величины температуры поверхности моря за четырехлетний период исследований (гистограмма) и ход усредненной кривой ее сезонной изменчивости

Выхолаживание верхнего 60-метрового слоя и глубокое перемешивание вод в зимние месяцы 2012 года привели к интенсивному обогащению верхнего продуктивного слоя биогенными элементами, что, в свою очередь, привело к «вспышке» водоросли *Emiliana huxleyi* (Lohmann) Hay & Mohler (Prymnesiophyceae), которая достигла максимальной за исследованный период численности. В результате этого цвет моря приобрел молочный оттенок, что было зарегистрировано с помощью космических спутников [7]. Кроме того, резко возросла численность диатомовых водорослей. Все это привело к снижению уровня развития динофитовых, уступающих вышеуказанным группам водорослей в скорости потребления биогенных элементов и размножения. Видовое богатство всех динофлагеллят (включая светящихся видов) в этот период достигло минимальных значений за 4 года. Но, как было показано, резкое потепление вод в весенний период этого года снова привели к увеличению разнообразия.

2013 год отличался максимальным разбросом значений видового богатства динофлагеллят, с минимумами в марте (абсолютный минимум за все 4 года) и максимумами в мае и октябре. Существенное увеличение ТПМ у поверхности в мае, при котором отклонение от среднего уровня составило  $\Delta T = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , привело к мощному всплеску биомассы светящихся и поля биолюминесценции. В осенний период отрицательные аномалии ТПМ ( $\Delta T = -1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $\Delta T = -2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  в сентябре и октябре, соответственно) привели к существенному снижению ИБ во всем 60-ти метровом, и особенно в верхнем 10-ти метровом слоях, что не наблюдалось за весь период мониторинга. Типичная для осеннего периода картина вертикального распределения поля биолюминесценции [3] восстановилась только в ноябре, а максимум его развития сместился на декабрь.

## ВЫВОДЫ

На примере четырехлетнего мониторинга в прибрежье Севастополя подтверждена сопряженность вертикальной структуры поля биолюминесценции, обусловленная биомассой светящихся динофлагеллят, с термохалинной структурой вод и наблюдаемой дистанционно со спутников температурой поверхности моря. Максимумы развития динофлагеллят наблюдались в весенний и осенний периоды, преимущественно в верхнем квазиоднородном слое. В период стагнации в верхних слоях (летом) развитие продолжается под термоклином, а в зимний – слои динофлагеллят равномерно распределены во всей 60-ти метровой толще воды.

Динамика исследуемых параметров имела сходные тенденции: после абсолютно максимального уровня развития динофлагеллят в условиях повышенного температурного

режима в 2010 году, что выразилось в соответствующем увеличении интенсивности биолюминесценции, а также высоком видовом богатстве, наметилась тенденция снижения характеристик к 2012 году, который характеризовался минимальной температурой в зимний период, что отрицательно сказалось на развитии динофлагеллят, как в количественном (биомасса светящихся динофлагеллят и соответственно, поля биолюминесценция), так и в качественном (количество видов как светящихся, так и не светящихся динофлагеллят) отношении.

Максимально быстрый прогрев в мае 2013 года и резкое снижение температуры в сентябре-октябре обусловили максимальную амплитуду колебаний количества видов динофлагеллят и их биомассы. Резкое похолодание привело к нарушениям в развитии вертикальной структуры поля биолюминесценции и смещению его осеннего максимума на декабрь.

Сопряженность параметров поля биолюминесценции с количественными характеристиками динофлагеллят подтверждается высокими значениями коэффициентов корреляции между ними. Так за 4-х летний период исследований величина выборочного коэффициента корреляции между интенсивностью биолюминесценции и биомассой светящихся динофлагеллят составила 0,91.

Получена обратная связь между видовым богатством и выравненностью в сообществе по численности. Так, наиболее равномерным сообщество динофлагеллят было в самый холодный период (зима 2012 года) с минимальным уровнем развития светящихся видов.

### Список литературы

1. Серикова И. М. Тонкая структура поля биолюминесценции как показатель агрегированности планктонных организмов и ее связь с динамическим режимом водных масс: автореферат дисс. на соискание науч. степени канд. биол. наук / И. М. Серикова; Ин-т биол. южных морей им. А. О. Ковалевского НАН Украины. – Севастополь, 2005. – 25 с.
2. Артамонов Ю. В. Региональные особенности межгодовой изменчивости поля температуры на поверхности океана / Ю. В. Артамонов, М. В. Бабий, Е. А. Скрипалева // Системы контроля окружающей среды. Средства и мониторинг: сб. науч. трудов / НАН Украины, МГИ.-Севастополь. – 2005. – С. 240–242.
3. Серикова И. М. Особенности сезонной динамики структуры поля биолюминесценции и ее сопряженность с параметрами динофитовых водорослей / И. М. Серикова И. М., Ю. В. Брянцева, В. И. Василенко // Мор. экол. журн. – 2013. – Т. 12, №3. – С. 66–72.
4. Брянцева Ю. В. Расчет объемов и площадей поверхности одноклеточных водорослей Черного моря / Ю. В. Брянцева, А. В. Сергеева, А. М. Лях. – Севастополь: Ин-т биол. южных морей НАН Украины, 2005. – 25 с. (Препринт / НАН Украины. Институт биологии южных морей).
5. Токарев Ю. Н. Новый гидробиофизический комплекс для экспрессной оценки состояния прибрежных экосистем / Ю. Н. Токарев, В. И. Василенко, В. Ф. Жук // Современные методы и средства океанологических исследований: XI Междунар. науч.-тех. конф., 25–27 нояб. 2009 г., матер. – Москва, 2009. – Ч. 3. – С. 23–27.
6. Серикова И. М. Особенности сезонной динамики поля биолюминесценции и биомассы светящихся динофлагеллят у Севастополя (2008 – 2009 гг.) / И. М. Серикова, Ю. В. Брянцева, Ю. Н. Токарев и др. // Наук. зап. Терноп. пед. уні-ту ім. В. Гнатюка. Сер. «Біологія». – 2010. – Спец. вип.: Гідроекологія, № 3 (44). – С. 230–234.
7. Ясакова О. Н. Аномальное цветение *Emiliania huxleyi* (Prymnesiophyceae) в Черном море в 2012 г. / О. Н. Ясакова, С. В. Станичний // Мор. экол. журн. – 2012. – Т. 11, №4. – С. 54.

**Брянцева Ю. В., Серикова И. М., Суслин В. В. Міжрічна змінність різноманіття дінофлагеллят та поля біолюмінесценції у прибережжі Севастополя // Екосистеми, їх оптимізація та охорона. Сімферополь: ТНУ, 2014. Вип. 11. С. 158–164.**

На прикладі чотирирічного моніторингу в узбережжі Севастополю підтверджена зв'язок між вертикальною структурою поля біолюмінесценції, обумовлена біомасою дінофлагеллят, що світяться та термохалінною структурою вод. Максимуми розвитку дінофлагеллят, що світяться спостерігались у весняний та осінній періоди, головним чином у верхньому квазіоднорідному шарі. У період стагнації у верхньому шарі (влітку) розвиток триває під термокліном, а взимку – шари дінофлагеллят рівномірно розподілені у всій 60-і метровій товщі води. Аномалії температури поверхні моря в дослідженні роки обумовлювали особливості динаміки усіх досліджених параметрів. Після абсолютно максимального рівня кількісного та якісного розвитку дінофлагеллят в умовах аномально високої температури води у 2010 році настала тенденція спаду розвитку на початку 2012 року, який характеризувався мінімальною середньою тепературою у зимовий період, з подальшим ростом у теплий. Максимально швидкий прогрів у травні та аномально низька температура у вересні та жовтні 2013 року обумовили максимальну амплітуду коливання у кількості видів дінофлагеллят та другий (після 2010 р.) та потужний «сплеск» розвитку дінофлагеллят що світяться та полю біолюмінесценції. Отримана зворотній зв'язок між видовим багатством та вирівняністю в угрупованні за чисельністю. Так, найбільш рівномірним угруповання було у самый холодний період (взимку 2012 р.) з мінімальним розвитком дінофлагеллят що світяться.

*Ключові слова:* поле біолюмінесценції, дінофлагелляти що світяться, біомаса, температура поверхні моря, Чорне море.

**Bryantseva Yu. V., Serikova I. M., Suslin V. V. Interannual variability of the dinoflagellates diversity and bioluminescence fields off the coast of Sevastopol** // Optimization and Protection of Ecosystems. Simferopol: TNU, 2014. Iss. 11. P. 158–164.

On the example of a four-year monitoring in the coastal zone of Sevastopol conjugation of the vertical structure of the bioluminescence field due to biomass luminescent dinoflagellates with the thermohaline structure of water was confirmed. Maximum of the dinoflagellates development in the spring and autumn periods, mainly in the upper mixed layer were observed. In the period of stagnation in the upper layers (summer) development continues below the thermocline, and in winter – layers of dinoflagellates are evenly distributed throughout the 60-meter water column. Anomalies in the sea surface temperature in the all period of investigations had been determining the specific dynamics of the studied parameters. After absolut maximum level of quantitative and qualitative development of dinoflagellates in abnormally high water temperatures in 2010, became a trend of downward development in 2012, which was characterized by a minimum average temperature in winter, with a consequent increase in the warm period. The fast warming in May and abnormally low temperature in September and October 2013 resulted in the maximum amplitude of fluctuations in the number of species of dinoflagellates and the second (after 2010), a powerful “splash” of development luminescent dinoflagellates and the bioluminescence field. We are got an inverse relationship between species richness and equitability in community by abundance. Thus, the most equitability community dinoflagellates was in the coldest period (winter 2012) with a minimum development level of luminous species.

*Key words:* field of bioluminescence, luminescent dinoflagellates, biomass, the sea surface temperature, the Black Sea.

*Поступила в редакцию 30.03.2014 г.*