

О.А. Юнев, С.К. Коновалов, В. Великова

**АНТРОПОГЕННАЯ ЭВТРОФИКАЦИЯ
В ПЕЛАГИЧЕСКОЙ ЗОНЕ
ЧЕРНОГО МОРЯ:**

долговременные тренды, механизмы, последствия

Москва
ГЕОС
2019

УДК 628.19(262.5)
ББК 28.080.1(922.8)
Ю 51

Рецензенты:

академик РАН **В.Н. Егоров**

Институт биологии южных морей А.О. Ковалевского РАН, Севастополь;
доктор географических наук **В.Н. Белокопытов**
Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

Юнев О.А., Коновалов С.К., Великова В.

Антропогенная эвтрофикация в пелагической зоне Черного моря: долговременные тренды, механизмы, последствия / Ин-т биологии юж. морей им. А.О. Ковалевского РАН; Морской гидрофиз. ин-т РАН. Москва: ГЕОС, 2019. 164 с.; 43 л. ил.; 13 табл.; Библиогр.: 352 назв.

ISBN 978-5-89118-790-0

DOI 10.34756/GEOS/2019.16.37827

В монографии обобщены результаты исследования долговременных изменений биологических, гидрохимических и биооптических характеристик, которые являются индикаторами эвтрофикации в пелагической зоне шельфа и глубоководной части Черного моря. На основе этих результатов, а также анализа гидрохимических и физических структур обеих частей моря и их изменений во второй половине 20-го столетия под воздействием природных и антропогенных факторов предложены механизмы эвтрофикации черноморского шельфа и глубоководной части моря. Показана роль изменения гидрометеорологических условий. Представлены расчеты годовой первичной продукции для различных периодов и районов Черного моря, позволившие проследить за изменением трофического статуса бассейна во второй половине 20-го – начале 21-го столетий. Проанализирована роль эвтрофикации в одной из ключевых экологических проблем черноморской экосистемы – неблагоприятных изменениях пищевой сети в пелагиали. На основе этого анализа предлагается механизм системных сдвигов в экосистеме Черного моря, происшедших в начале 1990-х гг., которые определили ее современное состояние. Монография рассчитана на широкий круг специалистов, аспирантов и студентов в области океанографии, гидробиологии и экологии, а также в смежных дисциплинах, связанных с Черным морем.

Yunev O.A., Konovalov S.K., Velikova V.

Anthropogenic eutrophication in the Black Sea pelagic zone: long-term trends, mechanisms, consequences / A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS; Marine Hydrophysical Institute of RAS. – Moscow: GEOS, 2019. 164 p.; 43 p. il.; 13 tabl.; Bibliogr.: 352 items.

ISBN 978-5-89118-790-0

DOI 10.34756/GEOS.2019.16.37827

In this book, we summarise results of research on long-term changes of biological, hydrochemical and biooptical properties, which represent indicators of anthropogenic eutrophication in the pelagic zone of the shelf and the open Black Sea. Based on these results and analysis of hydrochemical and physical structures of the shelf and open sea and their changes in the second half of the 20th century under anthropogenic and climatic pressures, eutrophication mechanisms for different parts of the Black Sea have been proposed. The role of the hydrometeorological conditions is demonstrated. Calculations of the rate of annual primary production for various periods and regions of the Black Sea are presented, which allowed tracing of changes in its trophic status in the second half of the 20th century – beginning of the 21st century. The role of eutrophication in one of the key ecological problems of the Black Sea ecosystem – the negative changes in the pelagic trophic web – has been analysed. Based on this analysis, a mechanism of regime shifts is proposed. They occurred in the early 1990s and identified the current status of the sea. We address this book to specialists, graduate students and students in the field of oceanography, hydrobiology and ecology, as well as in related disciplines related to the Black Sea.



Поддержано Учёными советами ФГБУН ИнБЮМ РАН и МГИ РАН.

Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 19-15-00004.19. Издание РФФИ не подлежит продаже.

© Коллектив авторов, 2019
© ГЕОС, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	9
Глава 1. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ АНТРОПОГЕННОЙ ЭВТРОФИКАЦИИ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМ И ЭТАПЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЕЕ МЕХАНИЗМОВ	14
1.1. Начальный этап	21
1.2. Концептуальная модель эвтрофикации прибрежных экосистем ...	24
1.2.1. Стресс-факторы морских экосистем	25
1.2.2. Реакция морских экосистем на их чрезмерное обогащение биогенными веществами	30
1.2.3. Факторы, модулирующие уровень эвтрофикации морских экосистем.....	34
Глава 2. МЕТОДОЛОГИЯ, МАТЕРИАЛ И ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ РАЗЛИЧНЫХ АСПЕКТОВ ЭВТРОФИКАЦИИ ЧЕРНОГО МОРЯ	38
2.1. Выделение суб-районов и их характеристика	38
2.2. Материал и источники данных	41
2.3. Исследование долговременных изменений индикаторов эвтрофикации и механизмов явления	42
2.3.1. Шельф	42
2.3.2. Глубоководная часть моря	44
2.4. Оценка годовой первичной продукции.....	48
Глава 3. МЕХАНИЗМЫ ЭВТРОФИКАЦИИ ЧЕРНОМОРСКОГО ШЕЛЬФА	51
3.1. Тренды индикаторов эвтрофикации	51
3.1.1. Фосфаты и нитраты в поверхностном слое в зимний период	51
3.1.2. Силикаты в поверхностном слое в зимний период	53
3.1.3. Концентрация кислорода в поверхностном слое и на горизонте под термоклином в летний период	54
3.2. Региональные особенности долговременных изменений индикаторов эвтрофикации	57
3.3. Различные фазы эвтрофикации шельфа	60
3.3.1. Первая фаза	61
3.3.2. Вторая фаза	62
3.4. Пост-эвтрофикационный период	67
Глава 4. МЕХАНИЗМЫ ЭВТРОФИКАЦИИ ГЛУБОКОВОДНОЙ ЧАСТИ МОРЯ	70
4.1. Тренды индикаторов эвтрофикации	70
4.1.1. Хлорофилл <i>a</i> в поверхностном слое и параметры его вертикального профиля в летний период	70

4.1.2.	Параметры вертикального профиля нитратов	72
4.1.3.	Глубина видимости диска Секки в летний период	74
4.2.	Особенности долговременных изменений индикаторов эвтрофикации	74
4.3.	Физические характеристики, модулирующие уровень эвтрофикации в глубоководной части моря	80
4.4.	Различные фазы эвтрофикации глубоководной части моря	82
4.4.1.	Первая фаза	82
4.4.2.	Вторая фаза	84
4.5.	Пост-эвтрофикационный период	90
Глава 5.	ИЗМЕНЕНИЕ ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА ЧЕРНОГО МОРЯ: ОЦЕНКА ВЕЛИЧИН ГОДОВОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ РАЙОНОВ И МЕЖГОДОВЫХ ПЕРИОДОВ	92
5.1.	История вопроса	92
5.2.	Восстановление внутригодовой динамики первичной продукции и оценка ее годовых величин для глубоководной части моря	95
5.2.1.	Начальный период и период интенсивной эвтрофикации	95
5.2.2.	Пост-эвтрофикационный период	97
5.3.	Восстановление внутригодовой динамики первичной продукции и оценка ее годовых величин для различных районов шельфа	100
5.3.1.	Период интенсивной эвтрофикации	100
5.3.2.	Начальный период	104
5.4.	Долговременные изменения годовой первичной продукции	106
5.5.	Изменение трофического статуса бассейна	109
Глава 6.	ВЛИЯНИЕ ЭВТРОФИКАЦИИ НА ТРАНСФОРМАЦИЮ АВТОХТОННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПИЩЕВОЙ СЕТИ В ПЕЛАГИАЛИ ЧЕРНОГО МОРЯ	113
6.1.	Предисловие	113
6.2.	Долговременные изменения запасов мелких пелагических рыб и биомассы фитопланктона	115
6.3.	Долговременные изменения Q-фактора	117
6.4.	Связь между величиной Q-фактора, конфигурацией пищевой сети в пелагиали и интенсивностью поступления биогенных веществ в море в различные периоды	120
6.4.1.	Дозэвтрофикационный период	121
6.4.2.	Период эвтрофикации	124
6.4.3.	Пост-эвтрофикационный период	130
	Заключение к главам 3–6	135
	Литература	139
	Условные сокращения и обозначения, глоссарий	159

CONTENTS

(English summaries are at the end of each chapter)

Preface	9
Chapter 1. CONCEPTS OF ANTHROPOGENIC EUTROPHICATION IN MARINE ECOSYSTEMS AND STAGES OF ITS MECHA- NISMS INVESTIGATION.....	14
1.1. Initial stage	21
1.2. Conceptual model of coastal ecosystems eutrophication.....	24
1.2.1. Stress-factors of marine ecosystems	25
1.2.2. The reaction of marine ecosystems to their excessive nutrients enrichment	30
1.2.3. Factors that modulate the level of marine ecosystems eutrophication .	34
Chapter 2. METHODOLOGY, MATERIAL AND APPROACHES TO INVESTIGATE DIFFERENT ASPECTS OF THE BLACK SEA EUTROPHICATION	38
2.1. Selection of sub-regions and their characteristics	38
2.2. Material and data sources	41
2.3. Investigation of long-term changes in eutrophication indicators and mechanisms of the phenomenon	42
2.3.1. Shelf	42
2.3.2. Open sea	44
2.4. Evaluation of annual primary production	48
Chapter 3. MECHANISMS OF THE BLACK SEA SHELF EUTROPHICA- TION	51
3.1. Trends of eutrophication indicators	51
3.1.1. Phosphates and nitrates in the surface layer in winter	51
3.1.2. Silicates in the surface layer in winter	53
3.1.3. Oxygen concentration in the surface layer and below the thermo- cline in summer	54
3.2. Regional features of long-term changes in eutrophication indicators ...	57
3.3. Different phases of the shelf eutrophication	60
3.3.1. The first phase.....	61
3.3.2. The second phase.....	62
3.4. Post-eutrophication period	67
Chapter 4. MECHANISMS OF THE OPEN BLACK SEA EUTROPHICA- TION	70
4.1. Trends of eutrophication indicators	70
4.1.1. Chlorophyll <i>a</i> in the surface layer and the parameters of its vertical profile in Summer	70

4.1.2.	Parameters of the nitrates vertical profile	72
4.1.3.	The Secchi disk depth in summer.....	74
4.2.	Features of long-term changes in eutrophication indicators	74
4.3.	Physical characteristics modulating the level of eutrophication in the open sea	80
4.4.	Different phases of the open sea eutrophication	82
4.4.1.	The first phase	82
4.4.2.	The second phase	84
4.5.	Post-eutrophication period	90
Chapter 5.	CHANGE IN THE TROPHIC STATUS OF THE BLACK SEA: EVALUATION OF ANNUAL PRIMARY PRODUCTION VALUES FOR DIFFERENT REGIONS AND INTERANNUAL PERIODS	92
5.1.	Background	92
5.2.	Reconstructing primary production seasonal patterns and evaluation of its annual values for the open sea	95
5.2.1.	Initial period and period of intensive eutrophication	95
5.2.2.	Post-eutrophication period	97
5.3.	Reconstructing primary production seasonal patterns and evaluation of its annual values for different shelf regions	100
5.3.1.	Period of intensive eutrophication	100
5.3.2.	Initial period	104
5.4.	Long-term changes in annual primary production	106
5.5.	Change in the basin trophic status	109
Chapter 6.	INFLUENCE OF EUTROPHICATION ON CHANNELING AUTOCHTONOUS ORGANIC MATTER THROUGH THE BLACK SEA PELAGIC FOOD WEB	113
6.1.	Preface	113
6.2.	Long-term changes in small pelagic fish stocks and phytoplankton biomass.....	115
6.3.	Long-term changes in Q-value	117
6.4.	Linkages between the Q-value, pelagic food web configuration and nutrient loading in different periods	120
6.4.1.	Pre-eutrophication period	121
6.4.2.	Eutrophication period	124
6.4.3.	Post-eutrophication period	130
	Conclusion to Chapters 3-6	135
	References	139
	Abbreviations and glossary.....	159