

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

# АНТРОПОГЕННАЯ ЭВТРОФИКАЦИЯ В ПЕЛАГИЧЕСКОЙ ЗОНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ:

долговременные тренды, механизмы, последствия



*Black Sea eutrophication. Image of EMODnet Central Portal.*



**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 областях 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 20<sup>th</sup> 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 20<sup>th</sup> century – beginning of the 21<sup>st</sup> 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 ФГБНУ ИнБИУМ 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 термоклинном 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.	<b>ИЗМЕНЕНИЕ ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА ЧЕРНОГО МОРЯ: ОЦЕНКА ВЕЛИЧИН ГОДОВОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ РАЙОНОВ И МЕЖГОДОВЫХ ПЕРИОДОВ .....</b>	<b>92</b>
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.	<b>ВЛИЯНИЕ ЭВТРОФИКАЦИИ НА ТРАНСФОРМАЦИЮ АВТОХТОННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ПИЩЕВОЙ СЕТИ В ПЕЛАГИАЛИ ЧЕРНОГО МОРЯ .....</b>	<b>113</b>
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.	Доэвтрофикационный 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.	<b>CHANGE IN THE TROPHIC STATUS OF THE BLACK SEA: EVALUATION OF ANNUAL PRIMARY PRODUCTION VALUES FOR DIFFERENT REGIONS AND INTERANNUAL PERIODS .....</b>	<b>92</b>
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.	<b>INFLUENCE OF EUTROPHICATION ON CHANNELING AUTOCHTONOUS ORGANIC MATTER THROUGH THE BLACK SEA PELAGIC FOOD WEB .....</b>	<b>113</b>
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