

## ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ КУРШСКОГО ЗАЛИВА НА ОСНОВАНИИ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ ФОРМ АЗОТА И ФОСФОРА В 2013–2017 ГОДАХ

*И.Л. Мальфанов, С.А. Вахрушева, Н.Е. Тренина*

*ФГБНУ «АтлантНИРО» г. Калининград  
[hydrolab@list.ru](mailto:hydrolab@list.ru)*

Мальфанов И.Л., Вахрушева С.А., Тренина Н.Е. Оценка состояния Куршского залива на основании анализа содержания форм азота и фосфора в 2013–2017 годах // Труды АтлантНИРО. 2017. Новая серия. Том 1, №. 4. Калининград: АтлантНИРО. С. 46–55.

На основании материалов гидрохимического мониторинга водоёмов Калининградской области, полученных в 2013–2017 гг., проведено исследование содержания и соотношений форм азота и фосфора в Куршском заливе. По исходным данным, собранным в 2013–2014 и 2016–2017 гг., рассчитаны величины среднемесячных концентраций азота нитратов, азота нитритов, аммонийного азота, общего азота, минерального фосфора и общего фосфора, а также описана динамика сезонного изменения концентраций биогенных элементов и их соотношений. На основании анализа сезонной динамики соотношений форм азота и фосфора установлено, что экосистема лагуны на протяжении вегетационного периода лимитирована азотом, что способствует возникновению в летние месяцы благоприятных условий для развития синезеленых водорослей. Высокие концентрации общего фосфора в воде Куршского залива позволяют отнести лагуну к водоёмам гиперэвтрофного типа. Выявлены превышения среднемесячных концентраций минерального фосфора и аммонийного азота в воде Куршского залива весной и летом 2015 г. Показано влияние весеннего превышения среднемесячных концентраций минерального фосфора и аммонийного азота на последующие изменения концентраций и соотношений форм азота и фосфора в июле. Выявлено превышение в начале вегетационного периода среднемесячных концентраций аммонийного азота в 3 раза и минерального фосфора в 5 раз, что привело к превышению их содержания в июле в 30 и 16 раз соответственно. Это свидетельствует о потенциальной чувствительности водоёма к антропогенным воздействиям.

**Ключевые слова:** азот нитратов, азот нитритов, аммонийный азот, общий азот, минеральный фосфор, общий фосфор, Куршский залив, синезеленые водоросли

Malfanov I.L., Vakhrusheva S.A., Trenina N.E. Assessment of the Curonian Lagoon state based on the analysis of nitrogen and phosphorus forms in 2013–2017 // Trudy AtlantNIRO. 2017. New series. Vol. 1, № 4. Kaliningrad: AtlantNIRO. P. 46–55.

Based on the materials of hydrochemical monitoring of reservoirs of the Kaliningrad region carried out in 2013–2017, the content and ratio of the forms of nitrogen and phosphorus in the Curonian Lagoon were studied. On the basis of the data collected in 2013–2014 and 2016–2017, the values of monthly average nitrogen concentrations of nitrates, nitrogen nitrites, ammonium nitrogen, total nitrogen, mineral phosphorus, total phosphorus were calculated, the dynamics of seasonal changes in the concentrations of biogenic elements and their ratios are shown. Based on the data of the seasonal dynamics of the ratios of nitrogen and phosphorus forms, it is established that the lagoon ecosystem during the vegetation period is limited by nitrogen, which contributes to the favorable conditions for the blue-green algae development in the summer months. High concentrations of total phosphorus in the water of the Curonian Lagoon enable the lagoon to be assigned to the reservoirs of the hypereutrophic type. The excess of the average monthly concentrations of mineral phosphorus and ammonium nitrogen

in the waters of the Curonian Lagoon in spring and summer of 2015 is revealed. The influence of the spring excess of the average monthly concentrations of mineral phosphorus and ammonium nitrogen on subsequent changes in the concentrations and ratios of nitrogen and phosphorus forms in July was shown (in July the excess of the average monthly concentration of ammonium nitrogen by 3 times and mineral phosphorus by 5 times led to the excess of their content in 30 and 16 times in July, respectively), which indicates the potential sensitivity of the reservoir to anthropogenic impacts.

**Key words:** nitrogen of nitrates, nitrogen of nitrites, ammonium nitrogen, total nitrogen, mineral phosphorus, total phosphorus, Curonian Lagoon, blue-green algae

## **Введение**

Куршский залив – крупная пресноводная лагуна Балтийского моря площадью 1584 км<sup>2</sup> и объемом 6,2 км<sup>3</sup> [Кунскас, 1978] с отличающимися от моря гидрологическим и гидрохимическим режимами [Науменко и др., 2004]. Соединения азота и фосфора поступают в Куршский залив вследствие процессов разложения органического вещества внутри экосистемы водоёма, с водным стоком реки Неман и в результате притока вод Балтийского моря [Гуделис, 1959]. В стационарном гидрологическом режиме изменение соотношений концентраций соединений азота и фосфора – результат множества одновременно протекающих биохимических процессов, среди которых важную роль играют ферментативный гидролиз белков, дезаминирование органического вещества с выделением аммония, последовательное окисление аммония до нитритов и нитратов, ассимиляция аммония, нитритов и нитратов микроорганизмами, редукция нитратов и нитритов денитрифицирующими бактериями, фиксация атмосферного азота водорослями и бактериями [Романенко, 2004].

Динамика изменений соотношений различных форм азота и фосфора определяет направленность и доминирование происходящих в водоёме биохимических процессов, позволяет оценить статус водоёма, указывает на возможность доминирования тех или иных форм фитопланктона [Лифанчук, 2017]. Ранее исследования динамики изменения концентраций биогенных элементов в Куршском заливе [Александров и др., 2006] позволили выявить сезонные закономерности колебаний концентраций форм азота и фосфора и связанные с этим процессы развития фитопланктона в водоёме.

Цель настоящей работы – представить данные по содержанию и соотношению форм азота и фосфора в Куршском заливе, полученные в 2013–2017 гг., определить общие закономерности сезонных изменений гидрохимических параметров водоёма и выявить влияние отклонений среднемесячных концентраций биогенных элементов в весенний период на изменение гидрохимического режима Куршского залива в последующие месяцы.

## **Материал и методика**

В феврале–ноябре 2013–2017 гг. сбор проб для определения биогенных элементов в Куршском заливе выполняли ежемесячно. Точки отбора проб располагались в акватории российской части Куршского залива (рис. 1). Основные исследования проводили в период с марта по ноябрь на 9–11 станциях, исследования в феврале проводили на прибрежной мониторинговой станции в районе НЭБ АтлантНИРО. Пробы воды отбирали в поверхностном слое на глубине 0–0,5 м. В период исследований было отобрано 446 проб воды, проведено более 5000 определений содержания форм азота и фосфора.

Определение концентраций форм азота (азот нитратов, азот нитритов, аммонийный азот, общий азот) и форм фосфора (минеральный фосфор, общий фосфор) проводили стандартными методами [Методы..., 1978; Руководство..., 2003] в ФГБНУ «АтлантНИРО». Средние значения концентраций (табл. 1, 2) получены путем пространственного и временного осреднения данных. Средние значения показателей рассчитывали со стандартной ошибкой ( $\pm M$ ), анализ данных проводился в электронных таблицах MS Excel.



Рис. 1. Расположение мониторинговых станций в Куршском заливе  
 Fig. 1. Location of monitoring stations in the Curonian Lagoon

Таблица 1

**Средние значения концентраций аммонийного азота (мкгN/л), азота нитритов (мкгN/л), азота нитратов (мкгN/л), азота общего (мкгN/л), фосфора минерального (мкгP/л) и фосфора общего (мкгP/л) за 2013, 2014, 2016 и 2017 гг.**  
**Average values of concentration of ammonium nitrogen ( $\mu\text{gN/l}$ ), nitrogen of nitrites ( $\mu\text{gN/l}$ ), nitrogen of nitrates ( $\mu\text{gN/l}$ ), total nitrogen ( $\mu\text{gN/l}$ ), mineral phosphorus ( $\mu\text{gP/l}$ ) and total phosphorus ( $\mu\text{gP/l}$ ), calculated by averaging of the data for 2013, 2014, 2016 and 2017**

Месяц	N <sub>аммония</sub>	N <sub>нитритов</sub>	N <sub>нитратов</sub>	N <sub>общий</sub>	P <sub>минеральный</sub>	P <sub>общий</sub>
Февраль	67±16	9±2	579±66	2425±762	11±4	72±26
Март	61±13	7±2	442±48	1891±278	5±1	76±26
Апрель	28±9	8±2	293±75	1878±318	4±2	51±6
Май	35±14	4±1	27±3	1514±228	6±2	62±4
Июнь	30±7	2±0	5±1	1375±220	8±4	103±14
Июль	19±5	2±0	4±0	1700±410	9±2	96±15
Август	25±8	2±0	13±5	1826±526	9±4	118±12
Сентябрь	40±6	0	19±3	2443±572	4±1	120±15
Октябрь	82±13	9±3	152±31	2614±513	7±2	131±21
Ноябрь	100±27	14±2	215±27	1903±109	24±11	92±40

**Значения концентраций аммонийного азота (мкгN/л), азота нитритов (мкгN/л), азота нитратов (мкгN/л), азота общего (мкгN/л), фосфора минерального (мкгP/л) и фосфора общего (мкгP/л) в 2015 г.**  
**Values of concentration of ammonium nitrogen ( $\mu\text{gN/l}$ ), nitrogen of nitrites ( $\mu\text{gN/l}$ ), nitrogen of nitrates ( $\mu\text{gN/l}$ ), total nitrogen ( $\mu\text{gN/l}$ ), mineral phosphorus ( $\mu\text{gP/l}$ ) and total phosphorus ( $\mu\text{gP/l}$ ) in 2015**

Месяц	N <sub>аммония</sub>	N <sub>нитритов</sub>	N <sub>нитратов</sub>	N <sub>общий</sub>	P <sub>минеральный</sub>	P <sub>общий</sub>
Февраль	157±17	8±2	200±38	2468±145	34±5	54±11
Март	169±28	2±1	261±48	1000±70	26±1	133±7
Апрель	23±3	1±1	3±2	780±125	37±4	31±1
Май	26±2	3±0	7±1	792±113	25±1	98±25
Июнь	14±6	1±0	11±2	1168±36	6±2	103±13
Июль	576±54	1±0	4±1	2079±281	143±9	248±27
Август	55±10	1±0	4±1	1475±105	27±4	128±7
Сентябрь	49±4	2±0	4±0	1933±131	7±1	130±11
Октябрь	39±6	14±2	27±5	2017±259	22±2	74±8
Ноябрь	68±7	6±0	106±4	1400±55	16±1	106±8

### Результаты и обсуждение

Полученные данные в 2013–2014 и 2016–2017 гг. (табл. 1) свидетельствуют о значительных сезонных изменениях концентраций форм азота и фосфора, а также их удельных соотношений. Динамика изменений среднегодовых значений концентраций биогенных элементов в Куршском заливе в эти годы вполне укладывается в рамки сезонных тенденций, приводящихся в работах по данным гидрохимического мониторинга в предыдущие годы [Александров и др., 2006; Александров, 2010]. Однако в 2015 г., предположительно в результате антропогенного загрязнения, наблюдались аномальные концентрации минерального фосфора и аммонийного азота в весенний период, что нарушило гидрохимический баланс экосистемы Куршского залива и привело к резкому, вторичному увеличению концентраций минерального фосфора и аммонийного азота в летние месяцы (табл. 2).

**Аммонийный азот.** Аммоний образуется в процессе жизнедеятельности гидробионтов, фито- и зоопланктона. Попадает в воду в результате загрязнения промышленными и бытовыми стоками, смывами с земель сельскохозяйственного назначения. Концентрация аммонийного азота в воде залива в исследованные годы изменялась от  $19\pm 5$  до  $100\pm 27$  мкгN/л (табл. 1, рис. 2 а). Максимальные концентрации наблюдались в феврале, марте, октябре и ноябре, минимальные – в летние месяцы. Повышенное содержание азота аммония ранней весной и поздней осенью обусловлено накоплением биогенных элементов в холодное время года. Вследствие разложения органических останков водорослей происходит выделение минеральных форм азота и фосфора в воду, что вместе со снижением интенсивности биохимических трансформаций минеральных форм приводит к увеличению их содержания в воде залива в холодные осенние и весенние месяцы [Романенко, 2006]. Динамика сезонных изменений доли аммонийного азота среди минеральных форм азота также характеризуется весенне-осенними максимумами и летним минимумом (рис. 3 а).

В 2015 г. наблюдалась аномальная динамика колебаний концентрации аммонийного азота (табл. 2, рис. 2 б). В феврале его концентрация составила  $157\pm 17$  мкгN/л, в марте –  $169\pm 18$  мкгN/л. Это почти в 3 раза превысило среднемесячные концентрации, характерные для 2013–2014 и 2016–2017 гг. В апреле содержание аммонийного азота упало до средних величин и оставалось низким до июля. В июле средняя по заливу величина концентрации аммонийного азота резко возросла до  $576\pm 54$  мкгN/л, превысив предельно допустимую для рыбохозяйственных водоемов ( $400$  мкгN/л) [Приказ., 2016], а в конце лета снова снизилась до значений ниже  $60$  мкгN/л. Похожим образом изменялась и доля аммонийного азота среди минеральных форм азота (рис. 3 б). Подобное повышение концентрации и доли аммонийного азота в июле непосредственно связано с развитием фиксирующих азот водорослей *Ahanizomenon flos-aquae* и *Microcystis aeruginosa*, биомасса которых достигает пиковых значений в летние месяцы

[Дмитриева, 2017]. Синезеленые водоросли выделяют в воду ион аммония в качестве продукта жизнедеятельности, что приводит к повышению значений водородного показателя воды. Это ведет также к повышению концентраций анионов в воде вследствие увеличения их экстракции из органических останков и донных отложений. На рис. 4 приведены данные о сезонных изменениях величины водородного показателя в 2013, 2014, 2016 и 2017 гг. (рис. 4 а) и в 2015 г. (рис. 4 б).

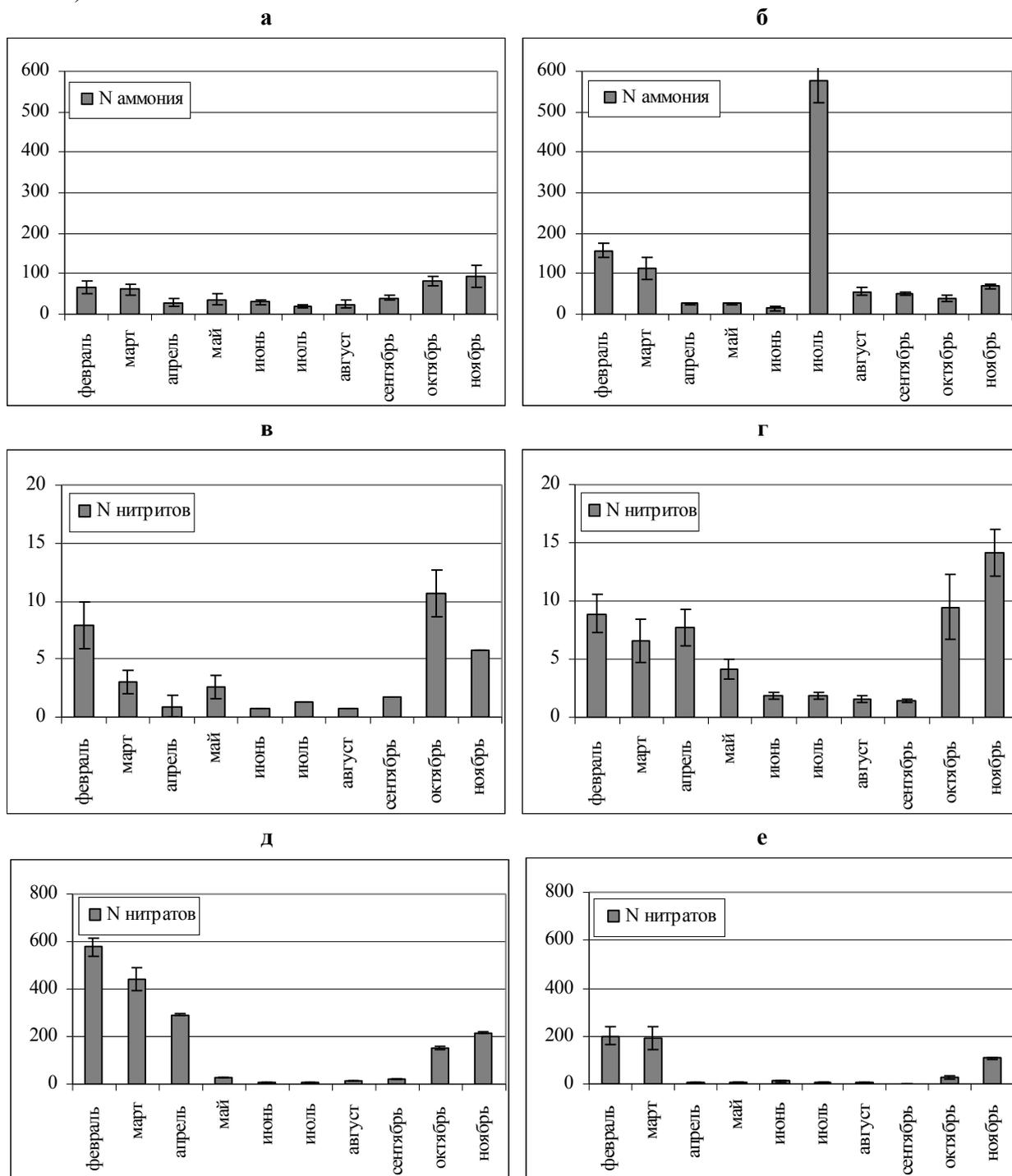


Рис. 2. Средние значения концентраций аммонийного азота (мкгN/л) (а), азота нитритов (мкгN/л) (в) и азота нитратов (мкгN/л) (д) за 2013, 2014, 2016 и 2017 годы и значения концентраций аммонийного азота (мкгN/л) (б), азота нитритов (мкгN/л) (г) и азота нитратов (мкгN/л) (е) в 2015 г.

Fig. 2. Average values of concentration of ammonium nitrogen ( $\mu\text{gN/l}$ ) (а), nitrogen of nitrites ( $\mu\text{gN/l}$ ) (в) and nitrogen of nitrates ( $\mu\text{gN/l}$ ) (д) for 2013, 2014, 2016 and 2017 and values of concentration of ammonium nitrogen ( $\mu\text{gN/l}$ ) (б), nitrogen of nitrites ( $\mu\text{gN/l}$ ) (г) and nitrogen of nitrates ( $\mu\text{gN/l}$ ) (е) in 2015

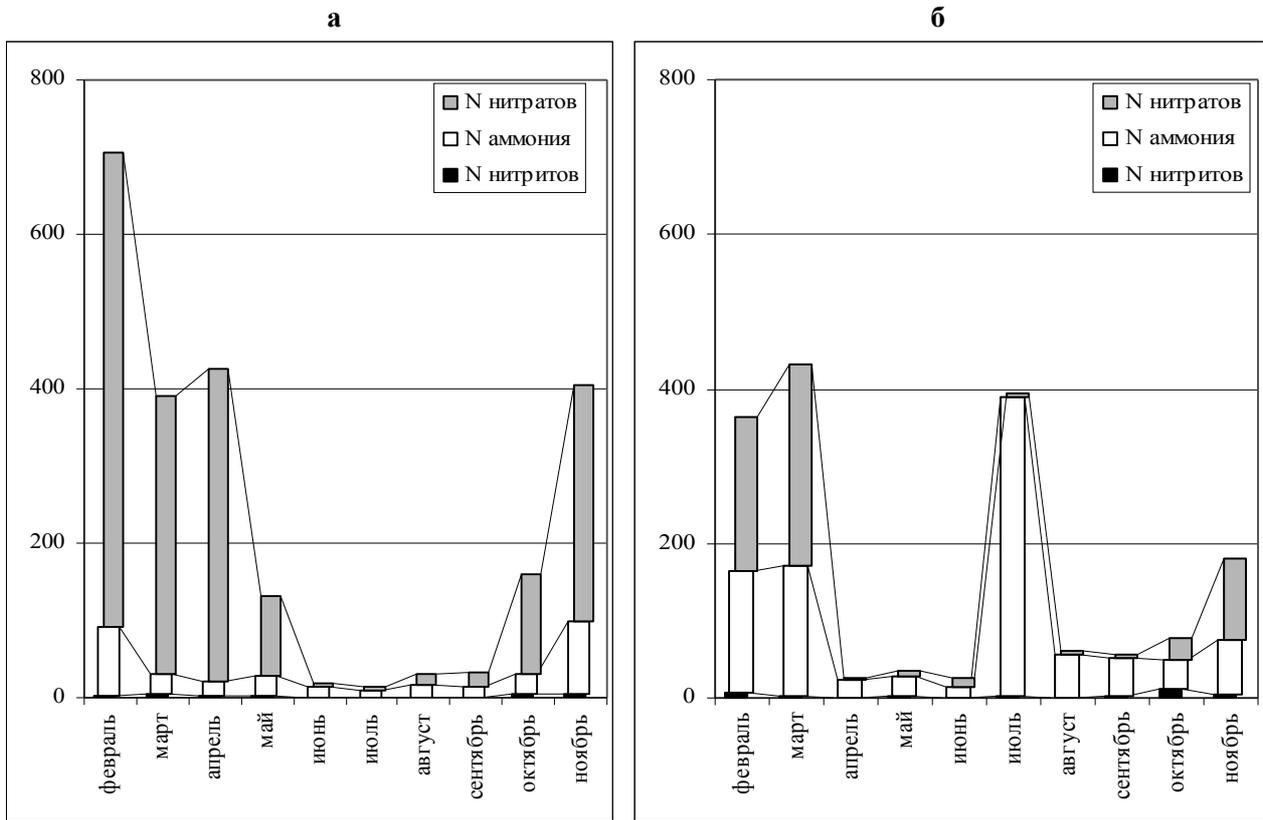


Рис. 3. Средние значения концентраций (мкгN/л) аммонийного азота, азота нитритов, азота нитратов и их соотношений за 2013, 2014, 2016 и 2017 гг. (а) и значения концентраций азота аммония, азота нитритов, азота нитратов и их соотношений в 2015 г. (б)

Fig. 3 Average values of concentrations ( $\mu\text{gN/l}$ ) of ammonium nitrogen, nitrogen of nitrites, nitrogen of nitrates and their ratios for 2013, 2014, 2016 and 2017 (a) and values of concentration of nitrogen of ammonium, nitrogen of nitrites, nitrogen of nitrates and their ratios in 2015 (б)

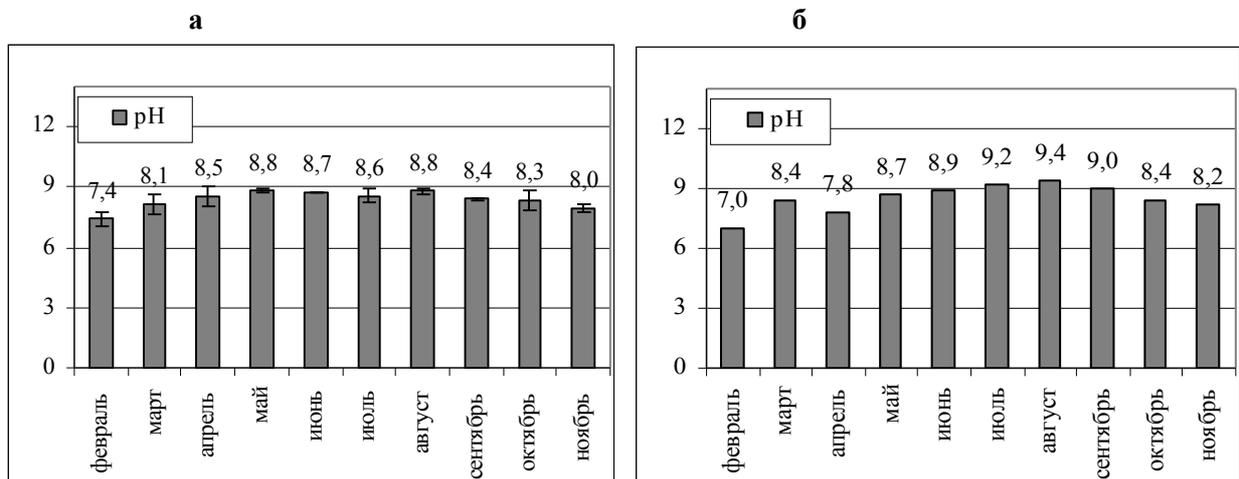


Рис. 4. Средние значения водородного показателя в 2013, 2014, 2016 и 2017 гг. (а) и 2015 г. (б)

Fig. 4. Average values of pH for 2013, 2014, 2016, 2017 (a) and in 2015 (б)

**Нитриты.** Нитриты образуются в процессе окисления азотсодержащих органических веществ. Их повышенное содержание свидетельствуют о недавнем органическом загрязнении водоема. Попадают они в воду в результате загрязнения хозяйственными и бытовыми стоками, смывами с полей и при проведении удобрения прудов. Могут восстанавливаться из нитратов в анаэробных условиях, в грунтах водоемов [Романенко, 2006]. Нитриты как промежуточный продукт окислительно-восстановительных процессов содержатся в воде в небольших количествах. В 2013–2017 гг. их содержание в воде залива изменялось в диапа-

зоне от 0 до  $14 \pm 2$  мкгN/л (табл. 1, рис. 2 в). Наибольшая концентрация азота нитритов отмечена в марте–апреле и октябре–ноябре, что связано с протеканием процессов, изложенных выше при описании сезонных колебаний концентрации аммонийного азота. С марта по сентябрь содержание азота нитритов постепенно снижалось с  $7 \pm 2$  до 0 мкгN/л вследствие возрастания поглощения нитритов в процессе увеличения биомассы фитопланктона в весенне-летний период. В 2015 г. динамика изменений содержания нитритов была похожа на такую в другие годы периода наблюдений (табл. 2, рис. 2 г).

**Нитраты.** Содержание азота нитратов в воде залива в 2013, 2014, 2016 и 2017 гг. изменялось от  $4 \pm 1$  до  $579 \pm 54$  мкгN/л (табл. 1, рис. 2 д). Высокие концентрации азота нитратов наблюдались в феврале, марте и апреле, а также в октябре и ноябре. С февраля по июль содержание азота нитратов уменьшалось с  $579 \pm 66$  до  $4 \pm 0$  мкгN/л вследствие наступления вегетационного периода и поглощения нитратов фитопланктоном, численность и биомасса которого значительно возрастают от весны к лету [Дмитриева, 2017]. С июля по ноябрь концентрация азота нитратов увеличивалась до  $215 \pm 27$  мкгN/л вследствие завершения вегетационного периода и постепенного разложения органических азотсодержащих веществ, сопровождающегося нитрификацией и переходом всех неорганических форм азота в наиболее окисленную нитратную форму. Доля азота нитратов среди минеральных форм азота изменялась аналогичным образом (рис. 3 а)

Если в феврале–марте 2015 г. концентрация аммонийного азота была почти в 3 раза выше, чем в другие годы, то содержание нитратов, наоборот, было ниже среднегодовых значений в 2-3 раза (табл. 2, рис. 1 е). Доля азота нитратов среди минеральных форм азота была сопоставима с долей азота аммония (рис. 3 б), что существенно отличалось от среднегодового тренда распределения форм азота.

**Минеральный фосфор.** Динамика сезонных изменений концентраций минерального фосфора в Куршском заливе характеризуется сложными закономерностями (табл. 1, рис. 5 а). В 2013, 2014, 2016 и 2017 гг. его средняя концентрация изменялась в пределах от  $4 \pm 1$  до  $24 \pm 11$  мкгP/л. Максимальные концентрации минерального фосфора наблюдались в феврале и ноябре, что можно объяснить зимней аккумуляцией фосфатов. Некоторое повышение содержания минерального фосфора в воде залива происходило в летние месяцы, что связано с активной минерализацией органических веществ в теплой воде и поступлением фосфатов из донных отложений.

Отчетливо прослеживается динамика снижения концентрации минерального фосфора в апреле–июне и июле–сентябре. В первом случае снижение обусловлено поглощением фосфатов вследствие начала периода активной вегетации фитопланктона. Во втором случае падение содержания минерального фосфора в воде является следствием его аккумуляции массово развивающимися при возрастании температуры синезелеными водорослями.

Весной 2015 г. концентрация фосфора фосфатов в 5 раз превысила среднегодовые значения для этого периода. В июне она упала до средних значений, а в июле повысилась до  $143 \pm 9$  мкгP/л (табл. 2, рис. 5 б), что почти в 16 раз превысило среднемесячную величину, наблюдавшуюся в 2013, 2014, 2016 и 2017 гг.

При этом величины и динамика изменения содержания общего азота и общего фосфора в 2015 г. (рис. 5 г, е) были сопоставимы с таковыми в 2013, 2014, 2016 и 2017 гг. (рис. 5 в, д). Среднегодовая концентрация общего азота в 2013, 2014, 2016 и 2017 гг. составила  $1957 \pm 205$  мкгN/л, а в 2015 году  $1504 \pm 310$  мкгN/л. Среднегодовые концентрации общего фосфора в 2013, 2014, 2016 и 2017 гг. и в 2015 г. также были сопоставимы –  $92 \pm 13$  и  $107 \pm 30$  мкгP/л. Исходя из классификации типов водоемов по содержанию общего фосфора, эти значения позволяют классифицировать Куршский залив как гиперэвтрофный [OECD, 1982]. Можно предположить, что в 2015 г. не было возрастания биомассы фитопланктона, но существенно изменился его видовой состав.

Согласно принципу лимитирования Либиха, скорость развития биологического процесса определяется тем элементом, концентрации которого находятся в наибольшем относительном дефиците. Среднее атомное отношение азота к фосфору в составе клеточного веще-

ства в среднем составляет 16:1 [Redfield, 1958]. Экспериментальными наблюдениями как в макрокосмах, так и в озерах было показано, что это отношение в клетках водорослей может варьировать в весьма широком диапазоне в зависимости от физиологических условий развития фитопланктона и его видового состава, но в целом измеренное в воде соотношение этих элементов может служить хорошим индикатором лимитирования по одному из них. В случае значительного превышения отношения Рэдфилда лимитирует фосфор, при низком отношении – азот. В Куршском заливе в 2013, 2014, 2016 и 2017 гг. с началом вегетационного периода соотношение минерального азота к минеральному фосфору уменьшается с 11,0 в мае до 2,9 в июле, а затем снова увеличивается к сентябрю до 13,4 (табл. 3). Среднее соотношение форм минерального азота к минеральному фосфору в вегетационный период составило 7,0.

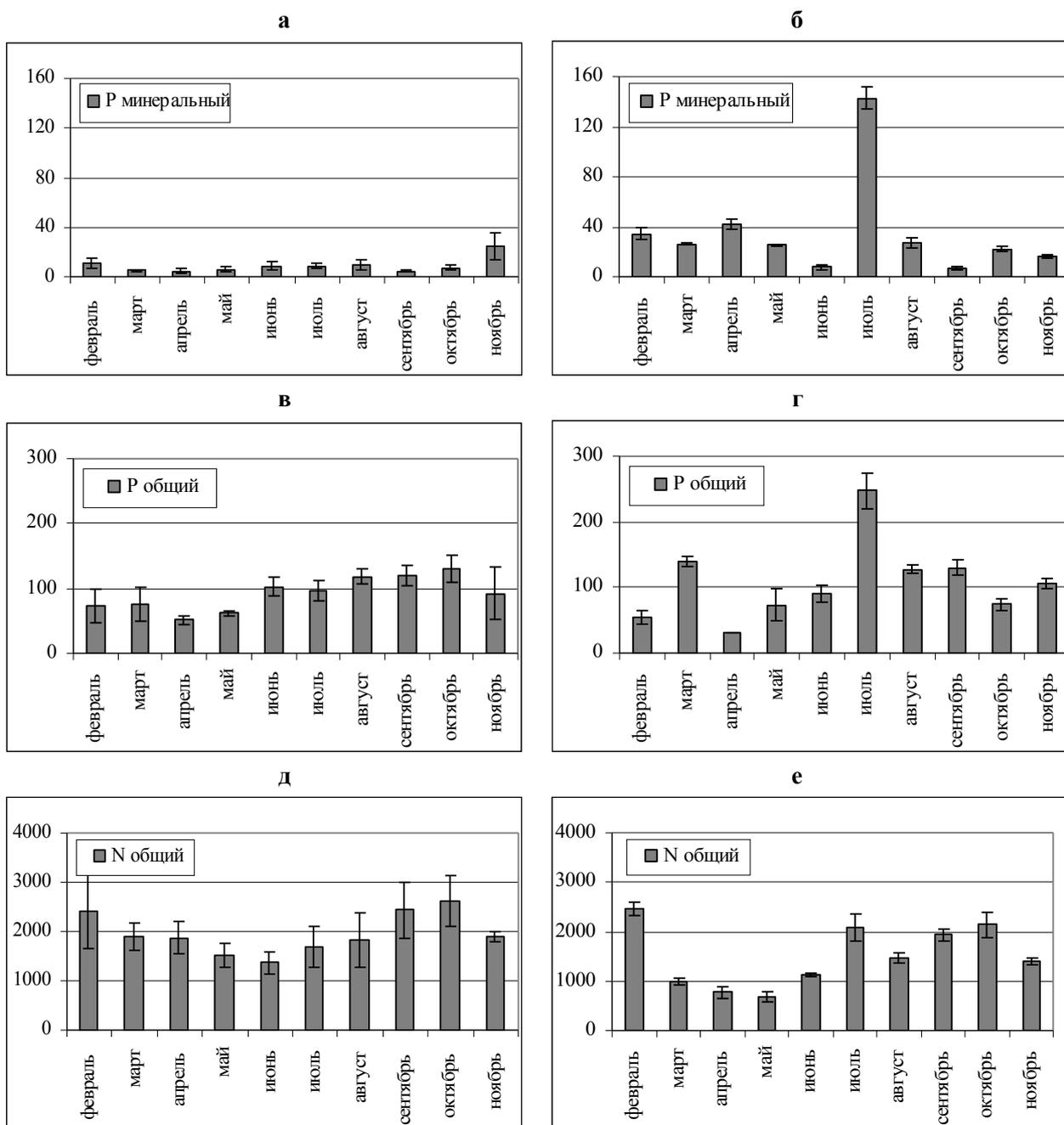


Рис. 5 Средние значения концентраций (мкгP/л) фосфора минерального (а), фосфора общего (в), азота общего (мкгN/л) (д) за 2013, 2014, 2016 и 2017 годы и значения концентраций фосфора минерального (б), фосфора общего (г) и азота общего (мкгN/л) (е) в 2015 г.

Fig. 5 Average values of concentrations of mineral phosphorus ( $\mu\text{gP/l}$ ) (а), total phosphorus ( $\mu\text{gP/l}$ ) (в), total nitrogen ( $\mu\text{gN/l}$ ) (д) for 2013, 2014, 2016 and 2017 and values of concentrations of mineral phosphorus ( $\mu\text{gP/l}$ ) (б), total phosphorus ( $\mu\text{gP/l}$ ) (г) and total nitrogen ( $\mu\text{gN/l}$ ) (е) in 2015

Таблица 3

**Соотношение концентраций форм азота и фосфора в 2013, 2014, 2016 и 2017 гг. и в 2015 г.  
Ratio of concentrations of nitrogen and phosphorus forms in 2013, 2014, 2016, 2017 and in 2015**

Месяц	2013, 2014, 2016 и 2017 гг.				2015 г.			
	$N_{\text{мин}}/P_{\text{мин}}$	$N_{\text{общ}}/P_{\text{общ}}$	$N_{\text{общ}}/N_{\text{мин}}$	$P_{\text{общ}}/P_{\text{мин}}$	$N_{\text{мин}}/P_{\text{мин}}$	$N_{\text{общ}}/P_{\text{общ}}$	$N_{\text{общ}}/N_{\text{мин}}$	$P_{\text{общ}}/P_{\text{мин}}$
Май	11,0	24,4	22,8	10,2	1,4	9,3	19,1	2,9
Июнь	4,3	13,4	37,4	12,1	3,3	12,5	43,1	11,5
Июль	2,9	17,7	67,8	11,0	4,1	8,4	3,6	1,7
Август	4,2	15,5	46,4	12,4	2,3	11,5	24,4	4,8
Сентябрь	13,4	20,3	40,7	26,8	7,8	14,8	35,3	18,7

Таким образом, экосистема Куршского залива в вегетационный период лимитирована азотом, что создает благоприятные предпосылки для развития синезеленых водорослей [Schindler, 1977], масса которых в Куршском заливе в летний период может составлять до 77% от суммарной биомассы водорослей [Дмитриева, 2017]. Физиологическая особенность этой группы водорослей – способность фиксировать атмосферный азот. Кроме того, даже не фиксирующие азот виды, например *Microcystis aeruginosa*, обладают способностью накапливать азот нитратов в клетках, вследствие чего получают конкурентное преимущество среди других видов фитопланктона в лимитированных азотом водоёмах. Уменьшение соотношения минеральных и общих форм азота и фосфора в воде лагуны может служить индикатором доминирования синезеленых водорослей в Куршском заливе. В 2015 г. в мае соотношение минерального азота к минеральному фосфору составило 1,4 и до сентября не поднималось выше 7,8 (табл. 3). Среднее соотношение форм минерального азота к минеральному фосфору в вегетационный период составило 4,0, что значительно ниже соотношения азота и фосфора в клетках синезеленых водорослей равного 9,7 [Сиренко, Гавриленко, 1978], а следовательно благоприятно для развития и доминирования азотфиксирующих видов фитопланктона.

Таким образом, суммируя вышесказанное можно сделать вывод, что превышение весной в 2015 г. (в начале вегетационного периода) содержания азота аммония в 3 раза и фосфора фосфатов в 5 раз в воде Куршского залива привело к гиперцветению воды в результате развития синезеленых водорослей в июле. Вследствие этого в июле 2015 г. концентрация аммонийного азота возросла в 30 раз, на 0,6 единиц возросло значение водородного показателя. Это, в свою очередь, вызвало увеличение концентрации минерального фосфора в воде лагуны в 16 раз, предположительно вследствие увеличения экстракции фосфатов из органических останков и донных отложений.

В 2016–2017 гг. сезонная динамика изменения концентраций и соотношений форм азота и фосфора восстановилась и гидрохимический режим Куршского залива нормализовался.

### Заключение

Выполнен анализ сезонной динамики содержания минеральных и органических форм азота и фосфора и их соотношений в период 2013–2017 гг. Среднемесячные значения концентраций форм азота и фосфора в 2013, 2014, 2016 и 2017 гг. и их сезонные колебания соответствовали многолетним тенденциям, характерным для Куршского залива.

Экосистема лагуны лимитирована в вегетационный период азотом, что способствует возникновению в летние месяцы гиперэвтрофного состояния с концентрациями и соотношениями минеральных форм азота и фосфора, благоприятными для развития азотфиксирующих видов синезеленых водорослей.

В 2015 г. наблюдались превышения среднемесячных концентраций аммонийного азота и минерального фосфора в начале вегетационного периода, что привело к изменению

гидрохимического режима Куршского залива и, как следствие – искажению сезонных пропорций распределения форм биогенных элементов. Произошло интенсивное развитие синезеленых водорослей и вторичное, многократное повышение концентраций аммонийного азота и минерального фосфора в июле. При этом концентрация аммонийного азота превысила предельно допустимую для рыбохозяйственных водоемов. Превышение в начале вегетационного периода среднегодовых концентраций аммонийного азота в 3 раза и минерального фосфора в 5 раз привело к превышению их содержания в июле в 30 и 16 раз соответственно. Таким образом оно выступило предиктором цветения воды в результате массового развития синезеленых водорослей. Подобная реакция экосистемы Куршского залива может говорить о чувствительности водоёма к потенциальным антропогенным воздействиям, в частности к попаданию в воды залива сельскохозяйственных удобрений, содержащих фосфаты и соли аммония.

### **Благодарности**

Благодарим Е.Н. Науменко за важные критические замечания и О.А. Дмитриеву, А.С. Семенову, С.В. Александрова за полезные советы.

### **Список литературы**

*Александров С.В., Сенин Ю.М., Смыслов В.А.* Первичная продукция, содержание хлорофилла и биогенных элементов как показатели экологического состояния Куршского и Вислинского заливов Балтийского моря // Биол. внутренних вод, 2006. № 1. С. 41–47.

*Александров С. В.* Первичная продукция планктона в лагунах Балтийского моря (Вислинский и Куршский заливы). Калининград: АтлантНИРО, 2010. 228 с.

*Гуделис В.* Геологические и физико-географические условия залива Куршю Марес / В. Гуделис // Куршю Марес: итоги комплексного исследования. Вильнюс, 1959. С. 7–47.

*Даценко Ю.С.* Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. С. 29.

*Дмитриева О.А.* Исследование закономерностей пространственно-временных изменений структурных и количественных показателей фитопланктона в различных районах Балтийского моря: дис. ... канд. биол. наук. М., 2017. С. 65–66.

*Кунскас Р.* Физико-географическое описание Куршского залива // Куршский залив, природные условия и развитие. Вильнюс, 1978. Т. 1. С. 11–50.

*Лифанчук А.В.* Эколого-физиологические характеристики доминирующих видов фитопланктона северо-восточной части Черного моря: дис. ... канд. биол. наук. М., 2017. С. 11–20.

Методы гидрохимических исследований океана. М.: Наука, 1978. 272 с.

*Науменко Е.Н., Сенин Ю.М., Смыслов В.А.* Общая характеристика Куршского залива // А.Ф. Алимов, М.Б. Иванова (ред.). Закономерности гидробиологического режима водоемов разного типа. Москва: Научный мир, 2004. С. 15–17.

*Романенко В.Д.* Основы гидроэкологии. Киев: Генеза, 2004. 664 с.

Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» от 13 декабря 2016 г. № 552. г. Москва

Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоёмов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: ВНИРО, 2003. 202 с.

*Сиренко Л.А., Гавриленко М.Я.* Цветение вод и эвтрофирование. Киев: Наукова думка, 1978. С. 33–38.

*OECD, 1982.* Eutrophication of Waters. Monitoring, Assessment and Control. Paris, 1982. 154 p.

*Redfield A. C.* The biological control of chemical factors in the environment / A. C  
Redfield // Am Sci, 1958. Vol. 46. P. 205–222.

*Schindler D.W.* Evolution of phosphorus limitation in lakes // Science, New Series, 1977.  
Vol. 195. № 4275. P. 260–262.

УДК 574.583