

ВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

УДК 519.24:581.526.325

ПОИСК СТАТИСТИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ В СИСТЕМЕ «БИОГЕННЫЕ ВЕЩЕСТВА - ФИТОПЛАНКТОН»

© 2012 г. Н.Н. Головатых¹, С.Н. Егоров²

1 – ФГУП «Каспийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства»,
Астрахань, 414056

2 – ООО «Эко-Лайн», Астрахань, 414000

Статья поступила в редакцию 4.07.2012 г.

Окончательный вариант 24.09.2012 г.

Проведен статистический анализ содержания основных биогенных веществ и количественных характеристик фитопланктонного сообщества в 1998-2007 гг. на примере северо-западной части Каспийского моря. В ходе корреляционно-регрессионного анализа выявлены тесные статистические связи между численностью и биомассой основных отделов водорослей и концентрацией минеральных форм азота и фосфора, с учетом влияния факторов среды.

Ключевые слова: фитопланктон, биогенные вещества, западная часть Северного Каспия, статистические методы, корреляционно-регрессионный анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Водоросли в экосистемах выступают в роли первичных продуцентов, обеспечивая веществом и энергией все последующие трофические уровни. В связи с этим особый интерес представляет развитие сообщества фитопланктона в условиях изменяющейся экологической факторной нагрузки. Оценить характер статистических связей между количественными и качественными показателями основных отделов фитопланктона, гидрологическими данными и биогенной составляющей представляется возможным при использовании различных методов статистического анализа.

Статистический анализ позволяет выявить причинно-следственные отношения (связи) между различными явлениями, что позволяет обнаружить факторы, оказывающие существенное влияние на вариацию изучаемых процессов (признаков) (Елисеева, Юзбашев, 2004). Статистика включает в себя множество методов изучения связей, выбор которых зависит от целей исследования и поставленных задач.

Биотическое сообщество, в частности фитопланктон, – сложная система, в которой исследуемый признак (например, численность или биомасса какого-либо отдела водорослей) может определяться целым комплексом причин (факторов).

Для исследования статистических связей в такой системе целесообразным является использование методов корреляционно-регрессионного анализа, состоящего из трех этапов.

Первый этап – корреляционный анализ. Его цель – определить характер и силу связи (Гусаров, 2003; Буданов, Лосева, 2009). Математической мерой корреляции служит коэффициент корреляции (в данной работе – коэффициент Пирсона (r)), который демонстрирует наличие линейной связи между исследуемыми величинами. Направление связи определяется знаком коэффициента корреляции,

сила – абсолютным значением, которое может изменяться от 0 до 1. Чем ближе абсолютное значение коэффициента корреляции к 1, тем теснее связь (Елисеева, Юзбашев, 2004).

Второй этап – построение регрессионных моделей. Его цель – определить форму полученной связи, а также степень влияния независимых переменных на зависимую (Гусаров, 2003). Осуществление регрессионного анализа в значительной степени зависит от результатов корреляционного анализа.

Одним из вариантов множественной регрессии является пошаговая регрессия, в ходе которой из регрессионной модели последовательно удаляются параметры, не оказывающие достоверного влияния на зависимую переменную.

Результаты множественной регрессии выражаются в виде уравнения регрессии и регрессионного графика.

В общем виде используют уравнение, которое представляет собой уравнение линейной связи между признаком (функцией) и исследуемыми вариантами (факторами) (Кобзарь, 2006; Елисеева, Юзбашев, 2004):

$$Y = a + b \times X_1 + c \times X_2 + \dots + k \times X_n,$$

где a, b, c, \dots, k – значения коэффициентов для факторов, участвующих в уравнении регрессии; X_1, X_2, \dots, X_n – факторы, участвующие в уравнении регрессии.

Если знак при коэффициенте положительный, то вклад рассматриваемого фактора прямой, если отрицательный – обратный. Достоверность полученной статистической связи определяется величиной r . Следует также обращать внимание на величину исправленного показателя коэффициента детерминации ($\text{Adjusted } R^2$), который показывает насколько качественно функция детерминирована факторами.

Третий этап – выяснение статистической значимости, т.е. пригодности полученной регрессионной модели для использования в целях прогнозирования на основе регрессионного графика и анализа остатков зависимой переменной.

На регрессионном графике кроме линии регрессии пунктиром строят доверительные интервалы (95%) и обычно наносят эмпирически найденные значения в виде точек. Чем больше таких точек укладывается в доверительные интервалы, тем сильнее факторы обуславливают показатель признака и тем качественнее уравнение описывает форму статистической связи.

Помимо построения регрессионного графика проводится анализ остатков для зависимой переменной (признака). Чем меньше модуль разницы между наблюдаемыми и предсказанными значениями, тем плотнее эмпирические значения располагаются вдоль линии регрессии и тем более достоверно полученное уравнение регрессии.

Целью работы являлось выявление взаимообусловленностей между биогенными веществами, гидрологическими параметрами и количественными характеристиками различных отделов фитопланктона с помощью методов корреляционно-регрессионного анализа.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Материалом для работы послужили результаты исследований, осуществленных сотрудниками лаборатории водных проблем и токсикологии, в том

числе авторами, в западной части Северного Каспия в летний период 1998-2007 гг. на научно-исследовательских судах ФГУП «КаспНИРХ».

Сетка станций отбора экспериментального материала представлена на рисунке 1. Приведенная схема объединяет все точки наблюдений на исследуемой акватории моря за период с 1998 по 2007 гг.

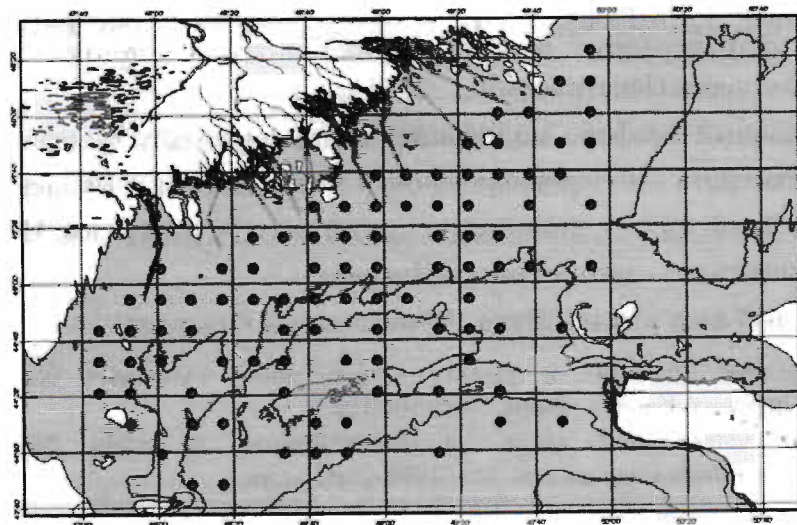


Рис. 1. Сетка станций отбора экспериментального материала. 1998-2007 гг.

Fig. 1. Grid stations selection of the experimental material. 1998-2007 years.

Данные по гидролого-гидрохимическому режиму Каспийского моря были получены из литературных источников (Катунин и др., 1999; 2002, 2004), а также любезно предоставлены сотрудниками лаборатории водных проблем и токсикологии ФГУП «КаспНИРХ» (табл. 1, 2).

Таблица 1. Средние значения и диапазон величин температуры, солености, pH и содержания кислорода. Западная часть Северного Каспия. Июнь 1998-2007 гг.

Table 1. Mean values and range of sizes of temperature, salinity, pH and maintenances of oxygen. The western part of Northern Caspian Sea. June 1998-2007 years.

Годы	T ^o C		S, ‰		O ₂ , мг/л		pH	
	Ср.	Размах	Ср.	Размах	Ср.	Размах	Ср.	Размах
1998	25,8	20,5-28,4	4,14	0,26-11,80	5,73	3,64-9,61	8,51	8,14-9,10
1999	23,8	19,8-26,7	6,00	0,01-12,69	5,90	4,87-7,62	8,70	8,41-9,14
2000	22,1	17,8-27,6	4,04	0,26-12,41	6,06	4,64-8,49	8,57	8,28-9,00
2001	22,0	18,9-26,8	3,21	0,20-11,23	6,48	5,48-8,58	8,61	8,21-8,98
2002	22,0	18,6-24,3	4,33	0,06-12,51	6,57	5,55-8,88	8,18	7,03-9,10
2003	21,2	19,0-23,4	6,29	0,21-11,98	6,18	5,19-7,85	8,42	8,21-8,85
2004	24,9	19,9-31,0	1,58	1,23-3,93	6,24	5,30-8,44	8,51	8,23-9,04
2005	23,9	21,3-27,4	1,70	0,19-10,04	5,94	3,40-8,00	8,64	8,35-8,95
2006	25,9	23,0-28,5	5,06	0,28-13,37	5,89	3,46-7,36	8,59	8,22-9,00
2007	23,4	21,2-26,5	2,97	0,12-11,39	6,24	4,53-10,22	8,56	8,17-8,97

Сведения по качественному и количественному составу фитопланктона были получены из литературных источников (Ардабьева и др., 2003, 2005, 2006), а также любезно предоставлены старшим научным сотрудником лаборатории гидробиологии ФГУП «КаспНИРХ» А.Г. Ардабьевой. Данные по численности и биомассе основных отделов фитопланктона представлены на примере 2007 г. в таблице 3. Гидробиологические показатели за другие годы представлялись подобным образом.

Корреляционно-регрессионный анализ проводился по результатам исследований за 10 лет – 1998-2007 гг. Выборка данных составила 873 наблюдения,

в том числе сведения по концентрации биогенных веществ – 418, по гидробиологическим показателям – 354.

Отбор проб для определения содержания основных биогенных веществ осуществлялся в экспедиционных условиях с поверхностного горизонта, с последующим хранением в морозильных установках при $t^{\circ}\text{C} = -20^{\circ}\text{C}$. Обработка проб проводилась спектрофотометрическим методом в лаборатории института. Определение концентрации основных биогенных элементов осуществлялось следующими методами (Инструкции..., 2011):

- минеральный фосфор - модифицированным методом Морфи и Райли;
- кремнекислота - модернизированный метод Динера и Ванденбульке;
- аммонийный азот - колориметрический метод с реактивом Несслера;
- нитритный азот - метод Грисса-Илосвая;
- нитратный азот - метод Вуда, Армстронга и Ричардса.

Таблица 2. Средние значения и размах концентраций основных биогенных веществ. Западная часть Северного Каспия. Июнь 1998-2007 гг.

Table 2. Mean values and range of concentrations of main biogenic substances. The western part of Northern Caspian Sea. June 1998-2007 years.

Годы	Рмин, мкг/л		Si, мкг/л		NH ₄ , мкг/л		NO ₂ , мкг/л		NO ₃ , мкг/л		Nмин, мкг/л	
	Ср.	Размах	Ср.	Размах	Ср.	Размах	Ср.	Размах	Ср.	Размах	Ср.	Размах
1998	10	0-25	1989	506-3540	83	23-196	1,0	0,0-9,0	13,0	1,6-45,0	97	25-204
1999	29	11-64	966	380-2244	90	42-194	4,5	0,0-28,4	17,8	0,0-109,0	112	53-234
2000	16	0-64	841	462-1575	88	28-215	4,0	0,0-34,7	10,1	0,0-86,0	102	28-288
2001	15	2-42	1332	379-3015	87	40-142	4,2	0,0-15,0	19,9	0,0-180,0	111	60-337
2002	16	0-38	1790	764-2823	98	16-187	5,2	0,0-21,0	31,5	0,0-188,0	135	36-391
2003	18	8-29	1144	328-2682	77	51-120	6,1	0,0-20,7	21,5	5,0-163,0	105	63-252
2004	18	8-36	1590	663-2938	81	32-132	5,8	1,8-13,0	25,0	7,0-76,0	112	49-205
2005	31	7-95	1488	348-3184	70	25-126	6,4	0,0-21,0	71,3	14-294	148	43-409
2006	9	0-45	741	154-3082	49	16-164	0,6	0,0-12,0	10,3	0,0-76,1	60	26-207
2007	29	14-68	918	103-2743	36	31959	4,4	0,0-24,8	8,6	1,3-53,1	50	18-120

Таблица 3. Гидробиологические показатели. Июнь 2007 г.

Table 3. Hydrobiological parameters. June 2007 years.

Показатель	Синезеленые водоросли		Диатомовые водоросли		Зеленые водоросли		Пиропитовые водоросли	
	N, млн. экз./м ²	B, мг/м ³	N, млн. экз./м ²	B, мг/м ³	N, млн. экз./м ²	B, мг/м ³	N, млн. экз./м ²	B, мг/м ³
ср.	161,0	530,4	462,0	2134,5	339,0	714,6	5,0	69,7
размах	0,5-367,2	3,0-2101,0	0,6-1611,4	1,0-7045,0	0,5-432,0	0,0-930,0	0,5-25,0	1,0-714,0

Определение температуры и прозрачности воды, реакции pH осуществлялось в экспедиционных условиях согласно установленным методикам (Руководство..., 1977). Содержание растворенного кислорода определялось по методу Винклера (РД 52.10.243-92).

Определение электропроводности (солености) воды осуществлялось в лабораторных условиях (РД 52.10.243-92).

Пробы фитопланктона отбирались с поверхностного горизонта, фиксировались 40%-ным раствором формалина и обрабатывались в лабораторных условиях осадочным методом П.И. Усачева (1961).

Результаты обрабатывались статистически по общепринятым методикам (STATISTICA for WINDOWS v5.0).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе выявления взаимосвязей между гидрохимическими и

гидробиологическими показателями в изучаемом биоценозе была осуществлена процедура корреляционного анализа с учетом гидрологических параметров среды.

В результате проведенного анализа были выявлены достоверные корреляционные связи между количественными характеристиками фитопланктона (численность и биомасса) и концентрацией минеральных форм азота (аммонийная, нитритная, нитратная) (табл. 4). Коэффициент корреляции (r) изменялся от $-0,64$ до $-0,89$ при $p < 0,05$. Обнаруженные корреляционные зависимости характеризуются как средние или тесные (Боровиков, 2003).

Также был осуществлен поиск корреляционных связей между показателями сообщества водорослей и гидрологическими характеристиками (табл. 4). Были выявлены средние и тесные связи с соленостью воды ($r = -0,71$ – $-0,79$ при $p < 0,05$), температурой воды ($r = 0,63$ – $0,70$ при $p < 0,05$), содержанием кислорода ($r = -0,69$ – $-0,73$ при $p < 0,05$).

Таблица 4. Результаты корреляционного анализа гидролого-гидрохимических и гидробиологических показателей. Июнь 1998-2007 гг.

Table 4. The results of correlation analysis of hydrologo-hydrochemical and hydrobiological parameters. June 1998-2007 years.

Показатели	Т°С	O ₂ , мг/л	S, ‰	NH ₄ , мкг/л	NO ₂ , мкг/л	Nмин, мкг/л
Нс/з, млн. экз/м ²	-	$r = -0,73$ N=10 $p < 0,05$	-	$r = -0,64$ N=10 $p < 0,05$	-	-
Вс/з, мг/м ³	-	-	-	$r = -0,65$ N=10 $p < 0,05$	-	-
Ндиат, млн. экз/м ²	-	-	$r = -0,71$ N=10 $p < 0,02$	-	-	-
Взел, мг/м ³	$r = 0,63$ N=10 $p < 0,05$	-	-	$r = -0,75$ N=10 $p < 0,02$	-	-
Нпиро, млн. экз/м ²	$r = 0,70$ N=10 $p < 0,05$	$r = -0,69$ N=10 $p < 0,03$	-	-	$r = -0,73$ N=10 $p < 0,02$	-
Впиро, мг/м ³	-	-	-	$r = -0,89$ N=10 $p < 0,01$	-	$r = -0,67$ N=10 $p < 0,04$

Обнаруженные корреляционные связи характеризуются величиной $p < 0,05$, что свидетельствует о высокой степени достоверности полученных результатов статистических исследований. Имеется лишь 5% вероятность того, что найденная связь между переменными является случайной особенностью данной выборки.

На основании полученных в результате корреляционного анализа данных, была осуществлена процедура множественной регрессии, которая проводилась отдельно для каждого отдела водорослей, представленного на исследуемой акватории моря.

В ходе анализа использовалась процедура пошаговой регрессии, позволяющая получить уравнение регрессии наивысшей значимости. Этап построения модели множественной регрессии производился на основании теоретического и практического анализов. На первой стадии намечался круг факторов, теоретически влияющих на результирующий признак. Результатом второй стадии являлся корреляционный анализ. Использовалась стратегия пошагового отбора, в ходе которой в регрессионное уравнение включались все отобранные факторы.

Затем зависимые переменные, не имеющие достоверного влияния на признак, из анализа исключались.

В качестве признака выступали численность или биомасса представителей отделов фитопланктона. В качестве факторов – в первую очередь, гидролого-гидрохимические показатели, имеющие высокие коэффициенты корреляции с величиной признака, полученные в ходе предварительного корреляционного анализа данных, во вторую – другие факторы, для которых корреляционный анализ не выявил тесных связей или высокой степени достоверности корреляции, но которые, однако, оказывают, по нашему мнению и на основании литературных источников, опосредованное влияние на развитие фитопланктонного сообщества.

В таблице 5 приведены параметры регрессионной модели, в которой в качестве признака выступает показатель численности (N) диатомовых водорослей, являющихся основным отделом фитопланктона на акватории исследований за период 1998-2007 гг. (по совокупности показателей: численности и биомассы).

Таблица 5. Показатели регрессионного уравнения для зависимой переменной: численность диатомовых водорослей.

Table 5. Parameters of a regression equation of the dependent variable: abundance of diatoms.

Adjusted R ² =0,98980084			
p<0,01 Std.Error of estimate: 17,747			
	B	St. Err. of B	p-level
Intercept	4118,391	590,1433	p<0,01
S‰	-59,202	4,0663	p<0,01
NH ₄	-5,348	0,3354	p<0,01
NO ₂	57,104	3,6620	p<0,01
O ₂	-282,724	31,3225	p<0,01
pH	-208,526	53,1956	p<0,02

Необходимо обратить внимание на высокий р-уровень уравнения регрессии в целом, а также на величину уточненного коэффициента детерминации. Первый отражает насколько достоверна полученная регрессионная модель, второй – насколько функция (численность диатомовых водорослей) определена факторами (S‰, NH₄, NO₂, O₂, pH). В данном случае регрессионное уравнение характеризуется низким значением р-уровня и высоким коэффициентом R², а значит высокой достоверностью связи и степенью детерминации функции рассматриваемыми факторами.

На рисунке 2 приведен график зависимости численности диатомового фитопланктона от S‰, NH₄, NO₂, O₂, pH. Выявленная статистическая обусловленность описывается следующей формулой:

$$N_{\text{диат}} = 4118,391 - 59,202 \times S\text{‰} - 5,348 \times \text{NH}_4 + 57,104 \times \text{NO}_2 - 282,724 \times \text{O}_2 - 208,526 \times \text{pH},$$

где: $N_{\text{диат}}$ – численность диатомовых водорослей, млн. экз./м²; S‰ – соленость воды, ‰; NH₄ – концентрация аммонийного азота, мкг/л; NO₂ – концентрация нитритного азота, мкг/л; O₂ – содержание кислорода в воде, мг/л; pH – величина реакции среды.

Следует отметить, что факторы, участвующие в уравнении регрессии, стоят не в хаотичном порядке, а в зависимости от величины р-уровня. В первую очередь расположены показатели, имеющие самую высокую достоверность полученной статистической связи, остальные размещены по убыванию.

Далее был произведен анализ остатков для зависимой переменной (табл. 6): сравнивались «наблюдаемые» и «предсказанные» значения, вычислялась разница между ними. «Наблюдаемые» значения – это величины численности исследуемого

отдела водорослей, полученные в ходе натурных наблюдений. «Предсказанные» значения были получены в результате решения уравнения регрессии, путем подставления в него величин факторов для каждого конкретного года. Чем меньше модуль разницы между «наблюдаемыми» и «предсказанными значениями», тем плотнее эмпирические значения располагаются вдоль линии регрессии и тем выше статистическая значимость полученного регрессионного уравнения.

По той же схеме был осуществлен множественный регрессионный анализ для зависимой переменной – биомассы диатомового фитопланктона. Ниже приведены уравнение регрессии и его показатели (табл. 7), график регрессии (рис. 3) и анализ остатков (табл. 8). Определено, что полученная статистическая связь достоверна ($p < 0,02$) и имеет высокую степень детерминированности функции исследуемыми гидролого-гидрохимическими факторами ($R^2 = 0,91$).

$$B_{\text{диат}} = 61924,96 - 562,35 \times S_{\text{‰}} - 16,59 \times NH_4 - 3877,80 \times O_2 - 493,93 \times T^{\circ}C - 2527,32 \times pH - 15,92 \times NO_3,$$

где: $B_{\text{диат}}$ – биомасса диатомовых, мг/м³; $S_{\text{‰}}$ – соленость воды, ‰; NH_4 – концентрация аммонийного азота, мкг/л; O_2 – содержание кислорода в воде, мг/л; $T^{\circ}C$ – температура воды, °C; pH – величина реакции среды; NO_3 – концентрация нитратного азота, мкг/л.

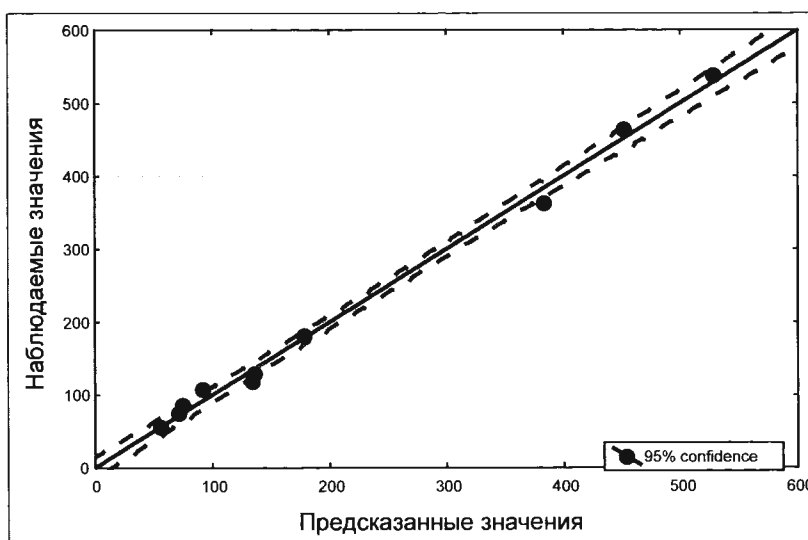


Рис. 2. Наблюдаемые и предсказанные значения численности диатомовых водорослей.

Fig. 2. Observed and predicted values of diatoms abundance.

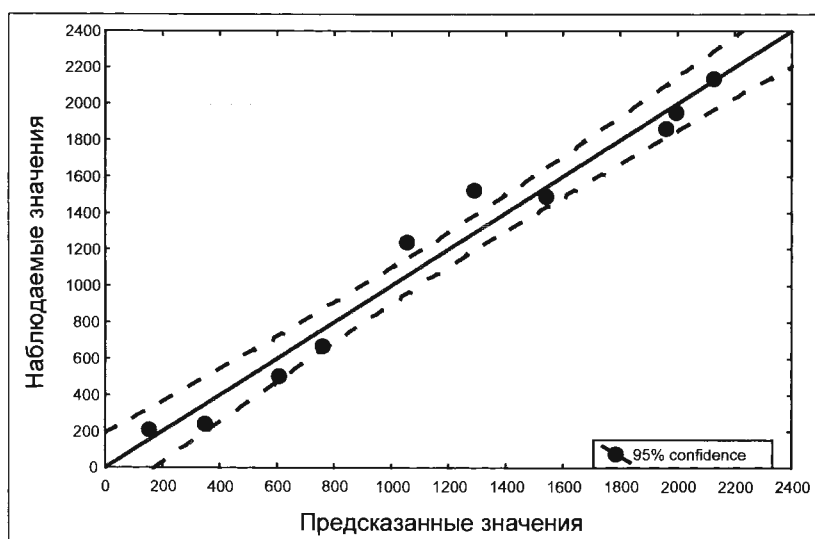
Таблица 6. Анализ остатков для зависимой переменной: численность диатомовых водорослей.

Table 6. Analysis of residuals for the dependent variable: abundance of diatoms.

Годы	Наблюдаемые значения	Предсказанные значения	Остатки	% остатка от набл. значения
1998	107,0870	91,9188	15,1682	14,16
1999	54,8000	56,5463	-1,7463	3,19
2000	128,8000	136,5989	-7,7989	6,06
2001	85,6000	75,4203	10,1797	11,89
2002	72,7000	71,6073	1,0926	1,50
2003	181,3000	179,4974	1,8026	0,99
2004	363,0000	384,0825	-21,0825	5,81
2005	536,0000	527,7817	8,2183	1,53
2006	118,8000	134,5377	-15,7377	13,25
2007	462,0000	452,0961	9,9039	2,14
Минимум	54,8000	56,5463	-21,0825	0,99
Максимум	536,0000	527,7817	15,1682	14,16
Среднее	211,0087	211,0087	-0,0000	0,00
Медиана	123,8000	135,5683	1,4476	4,50

Таблица 7. Показатели регрессионного уравнения для зависимой переменной: биомасса диатомовых водорослей.**Table 7.** Parameters of a regression equation of the dependent variable: biomass of diatoms.

Adjusted R ² =0,91381047			
p<0,02 Std.Error of estimate: 212,91			
	B	St. Err. of B	p-level
Intercept	61924,96	9429,500	p<0,01
S‰	-562,35	69,274	p<0,01
NH ₄	-16,59	4,118	p<0,03
O ₂	-3877,80	532,415	p<0,01
T ⁰ C	-493,93	74,621	p<0,01
pH	-2527,32	671,064	p<0,03
NO ₃	-15,92	4,923	p<0,05

**Рис. 3.** Наблюдаемые и предсказанные значения биомассы диатомовых водорослей.**Fig. 3.** Observed and predicted values of diatoms biomass.**Таблица 8.** Анализ остатков для зависимой переменной: биомасса диатомовых водорослей.**Table 8.** Analysis of residuals for the dependent variable: biomass of diatoms.

Годы	Наблюдаемые значения	Предсказанные значения	Остатки	% остатка от набл. значения
1998	1491,390	1542,471	-51,081	3,43
1999	210,700	152,430	58,270	27,66
2000	1865,200	1958,196	-92,996	4,99
2001	506,500	605,130	-98,630	19,47
2002	242,700	345,921	-103,221	42,53
2003	1236,800	1052,141	184,659	14,93
2004	1528,300	1291,071	237,229	15,52
2005	1952,800	1997,598	-44,798	2,29
2006	667,400	759,958	-92,558	13,87
2007	2134,500	2131,372	3,128	0,15
Минимум	210,700	152,430	-103,221	0,15
Максимум	2134,500	2131,372	237,229	42,53
Среднее	1183,629	1183,629	0,000	0,00
Медиана	1364,095	1171,606	-47,939	14,40

Анализ остатков для зависимой переменной (биомасса диатомовых водорослей) показал невысокие значения остатков, что означает высокую степень статистической значимости полученного регрессионного уравнения.

Следует также обратить внимание на последовательность факторов в полученных уравнениях регрессии. Как для уравнения, где в качестве признака выступает численность диатомовых водорослей, так и для уравнения,

определяющего биомассу, характерна первостепенная роль величины солености и содержания аммонийного азота для определения количественных характеристик рассматриваемого отдела фитопланктона.

Также был осуществлен регрессионный анализ для зависимой переменной численности и биомассы других представителей фитопланктонного сообщества: сине-зеленых, зеленых и пирифитовых водорослей (табл. 9). В качестве факторов в полученных регрессионных уравнениях выступают те же показатели, что и для диатомовых водорослей – величина температуры воды, соленость, содержание кислорода, концентрация минеральных форм азота и фосфора, кремнекислоты. Обнаруженные связи статистически достоверны ($p < 0,05$) и имеют высокую степень детерминированности функции (численности и биомассы водорослей) гидролого-гидрохимическими показателями.

Следует обратить внимание на очередность факторов в уравнениях регрессии: так для численности и биомассы сине-зеленых водорослей, и биомассы зеленых и пирифитовых водорослей наиболее весомую роль играет величина концентрации аммонийного азота.

Необходимо также отметить, что в качестве факторов, определяющих зависимую переменную (численность и биомасса основных отделов водорослей) выступают не только показатели, имеющие высокие коэффициенты корреляции с признаком, но и ряд других гидролого-гидрохимических характеристик. Вероятнее всего, некоторые факторы, не имеющие прямой или обратной четко выраженной тесной линейной связи (подтвержденной корреляционным анализом) с признаком, только в сочетании с другими факторами могут оказывать влияние на зависимую переменную.

Так, например, корреляционный анализ выявил обратную связь между численностью сине-зеленых водорослей и концентрацией аммонийного азота ($r = -0,64$ при $p < 0,05$). Тогда как регрессионный анализ показал совокупное влияние, помимо содержания солей аммония, еще и концентрации нитратного азота, а также минерального фосфора (табл. 9).

Таблица 9. Результаты множественной регрессии. 1998-2007 гг.

Table 9. Results of multiple regression. 1998-2007 years.

Зависимая переменная	Факторы	Регрессионное уравнение	Уточненный коэффициент детерминации (Adjusted R^2)
Нс/з	$NH_4, NO_3, R_{мин}$	$Nc/z = 536,5409 - 4,8845 \times NH_4 + 4,6319 \times NO_3 - 6,9401 \times R_{мин}$	$R^2 = 0,77$ при $p < 0,01$
Вс/з	$NH_4, NO_3, T^0C, NO_2, R_{мин}, Si$	$Vc/z = -2040,72 - 10,77 \times NH_4 + 6,82 \times NO_3 + 135,34 \times T_{пов} + 154,23 \times NO_2 - 26,19 \times R_{мин} - 0,21 \times Si$	$R^2 = 0,96$ при $p < 0,01$
Нзел	-	-	-
Взел	$NH_4, Si, NO_3, S\%, O_2, NO_2$	$Vzel = 2728,76 - 11,022 \times NH_4 + 0,352 \times Si - 7,283 \times NO_3 - 42,115 \times S\% - 306,987 \times O_2 + 41,074 \times NO_2$	$R^2 = 0,96$ при $p < 0,01$
Нпиро	NO_2	$Npipo = 11,70242 - 1,78908 \times NO_2$	$R^2 = 0,48$ при $p < 0,02$
Впиро	NH_4, Si	$Vpipo = 84,92390 - 1,07061 \times NH_4 + 0,01662 \times Si$	$R^2 = 0,85$ при $p < 0,01$

Аналогичный пример можно привести и для величины биомассы. В качестве признака использовалась биомасса зеленых водорослей. Корреляционный анализ выявил четкие зависимости между биомассой и содержанием аммонийного азота ($r = -0,75$, при $p < 0,05$). В ходе регрессионного анализа было обнаружено, что на

биомассу представителей отдела зеленых водорослей, на фоне воздействия концентрации солей аммония, оказывают влияние содержание кремниевой кислоты, нитратного и нитритного азота, величина солености воды и содержание кислорода.

Полученные данные согласуются со сведениями из литературных источников о том, что развитие альгоценозов определяется комплексом экологических факторов среды, включающих в себя, наряду с биогенным режимом, температурный режим, режим солености, свет и прозрачность (Прошкина-Лавренко, Макарова, 1968; Проект «Моря», 1996). Косвенное влияние оказывают ветер, морские течения, процессы вертикального перемешивания вод и т.д. (Малышева, Егоров, 2007).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, корреляционно-регрессионный анализ гидролого-гидрохимических и гидробиологических показателей подтвердил наличие тесных взаимосвязей в системе «биогенные вещества – фитопланктон». На примере акватории западной части Северного Каспия были изучены корреляционные связи между численностью и биомассой представителей фитопланктонного сообщества и концентрацией основных биогенных веществ с учетом влияния некоторых других экологических факторов.

С учетом результатов корреляционного анализа была осуществлена процедура регрессионного анализа. В качестве признака в регрессионных уравнениях выступали численность и биомасса основных отделов водорослей (диатомовые, сине-зеленые, зеленые и пиррофитовые), в качестве факторов – концентрации минеральных форм биогенных веществ, температура и соленость воды, величина pH, содержание кислорода.

Корреляционно-регрессионный анализ позволил выявить тесные и статистически достоверные взаимосвязи между величинами численности и биомассы водорослей и содержанием NH_4 , NO_3 , NO_2 , $\text{P}_{\text{мин}}$, Si, O_2 , S‰, $^{\circ}\text{C}$, pH.

На данном этапе исследований ставилась задача поэтапно показать методику корреляционно-регрессионного анализа взаимосвязей между биогенными веществами и фитопланктоном. В дальнейшем планируется более подробно изучить корреляционные связи между различными отделами водорослей и гидролого-гидрохимическими показателями с последующим ранжированием факторов по величине их влияния на формирование каждого конкретного отдела фитопланктона.

Целесообразность использования статистических методов в вопросе изучения взаимосвязей между абиотическими и биотическими факторами с целью получения более полной и детальной картины изменений, происходящих в системе «биогенные вещества – фитопланктон», не вызывает сомнений и должна выступать в качестве доказательного инструмента при анализе эмпирических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ардабьева А.Г., Татаринцева Т.А., Малиновская Л.В., Смирнова Л.В. Кормовая база Северного Каспия в 2002 г. // Рыбохозяйственные исследования на Каспии: Результаты НИР за 2002 г. Астрахань: Изд-во КаспНИРХа, 2003. С. 134-144.

Ардабьева А.Г., Татаринцева Т.А., Терлецкая О.В., Морозюк В.В. Фитопланктон Каспийского моря в 2004 г. // Рыбохозяйственные исследования на Каспии: Результаты НИР за 2004 г. Астрахань: Изд-во КаспНИРХа, 2005. С. 100-121.

Ардабьева А.Г., Тарасова Л.И., Малиновская Л.В. Кормовая база Северного Каспия в 2005 г. // Рыбохозяйственные исследования на Каспии: Результаты НИР за 2005 г. Астрахань: Изд-во КаспНИРХа, 2006. С. 123-132.

Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. СПб.: Питер, 2003. 688 с.

Буданов К.М., Лосева О.В. Практикум по общей теории статистики: Учебное пособие / Пенз. Гос. пед. Университет. Пенза, 2009. 92 с.

Гусаров В.М. Статистика: Учеб. пособие для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 463 с.

Елисеева И.И., Юзбашев М.М. Общая теория статистики: Учебник / Под ред. И.И. Елисеевой. 5-е изд., перераб. и доп. Москва: «Финансы и статистика», 2004. 656 с.

Инструкции по сбору и первичной обработке материалов водных биоресурсов Каспийского бассейна и среды их обитания. Астрахань: КаспНИРХ, 2011. 193 с.

Катунин Д.Н., Хрипунов И.А., Беспарточный Н.П. и др. Гидролого-гидрохимический режим нижнего течения р. Волги и Каспийского моря // Рыбохозяйственные исследования на Каспии: Результаты НИР за 1999 г. Астрахань: Изд-во КаспНИРХа, 1999. С. 10-28.

Катунин Д.Н., Хрипунов И.А., Беспарточный Н.П. и др. Гидролого-гидрохимический режим дельты Волги и Каспийского моря в 2001 г. // Рыбохозяйственные исследования на Каспии: Результаты НИР за 2001 г. Астрахань: Изд-во КаспНИРХа, 2002. С. 14-32.

Катунин Д.Н., Егоров С.Н., Кашин Д.В. и др. Основные черты гидролого-гидрохимического режима Каспийского моря в 2003 г. // Рыбохозяйственные исследования на Каспии: Результаты НИР за 2003 г. Астрахань: Изд-во КаспНИРХа, 2004. С. 15-31.

Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.

Малышева Н.Н., Егоров С.Н. Роль биогенных веществ в формировании качественных и количественных характеристик альгоценозов на примере акватории Северного Каспия // Труды Международного Форума по проблемам науки, техники и образования. / Под редакцией В.А. Малинникова, В.В. Вишневого. Москва: Академия наук о Земле, 2007. С. 122-126.

Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том VI. Каспийское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1996. 360 с.

Прошкина-Лавренко А.И., Макарова И.В. Водоросли планктона Каспийского моря. Ленинград: Наука, 1968. 270 с.

РД 52.10.243-92. Руководство по методам химического анализа морских вод / под ред. С.Г. Орадовского. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 208 с.

Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши / под ред. А.Д. Семенова. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 542 с.

Усачев П.И. Количественная методика сбора и обработки фитопланктона // Труды ВГБО. 1961. Т. XI. МАН СССР. С. 411-415.

**SEARCH FOR STATISTICAL RELATIONS IN THE BIOGENIC
SUBSTANCES-PHYTOPLANKTON SYSTEM IN THE WESTERN PART
OF THE NORTHERN CASPIAN**

© 2012 y. N.N. Golovatykh¹, S.N. Egorov²

1 – Caspian Fisheries Research Institute, Astrakhan

2 – ООО Eco-Line, Astrakhan

Statistical analysis of the content of main biogenic substances and quantitative characteristics of the phytoplankton community over the period of 1998-2007 years was made with the north-western part of the Caspian Sea taken as an example. In the course of correlation-regression analysis close statistical relations between the abundance and biomass of the main algae divisions and concentration of mineral nitrogen and phosphorus were revealed with impact of salinity, water temperature, oxygen content and pH taken into account.

Key words: phytoplankton, biogenic substances, western part of the Northern.