УДК 581.526.325(262.5)

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА СТРУКТУРНЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИТОПЛАНКТОННОГО СООБЩЕСТВА В СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЕ

З.З. Финенко, Л.В. Стельмах, И.М. Мансурова, Е.Ю. Георгиева, В.С. Цилинский

ФГБУН «Институт морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского РАН»
РФ, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2
E-mail: lustelm@mail.ru

Проведены комплексные исследования фитопланктонного сообщества в Севастопольской бухте, включающие измерения структурных, функциональных показателей и основных абиотических факторов среды с недельным интервалом отбора проб в течение года. Описана сезонная смена видового состава водорослей и зарегистрировано 9 продукционных циклов с продолжительностью развития от 0,5 до 2 месяцев. Установлено, что факторы внешней среды, контролирующие изменение структурных и функциональных показателей, в теплый и холодный периоды года были различны. Выявлено, что отдельные факторы в меньшей степени регулируют продукционные показатели фитопланктонного сообщества, чем их совместное действие.
Ключевые слова: фитопланктон, хлорофилл *a*, численность водорослей, удельная скорость роста, коэффициент переменной флуоресценции, биогенные вещества.

Введение. В морях и океанах, расположенных в умеренных широтах, в течение года наблюдается изменение численности водорослей в широких пределах и смена видового состава. С изменением условий среды происходят изменения таксономического состава фитопланктона. Как правило, диатомовые водоросли развиваются в зимне-весенний и осенний период, динофитовые и золотистые – летом. Однако эта закономерность может нарушаться в отдельные годы из-за изменения качества воды. Причины сезонной сукцессии фитопланктона могут быть обусловлены различными факторами. Основными из них считаются: световой и температурный режим, концентрация питательных веществ и конкуренция за них между видами, действие метаболитов, которые могут как стимулировать, так и ингибировать развитие водорослей и биологический цикл отдельных видов. По-видимому, сукцессия видов представляет собой результат одновременного взаимосвязанного влияния множества этих факторов. Комплекс физико-химических, биотических и других факторов определяет сложность функционирования фитопланктонного сообщества в пространстве и времени. Адекватное понимание функционирования сообществ зависит от анализа взаимодействия набора факторов, их прямого и косвенного влияния на отдельные виды. Изменение потока питательных веществ может вызвать изменение продуктивности водорослей, что оказывает влияние на все сообщество, и в результате приводит к смене доминирующих видов. Для понимания таких сложных взаимодействий мы можем сформулировать несколько гипотез:

1. В природных условиях несколько факторов оказывают более сильное совместное действие на структурные и функциональные показатели фитопланктона, чем один фактор. Сочетание факторов, оказывающих совместное влияние, в разные периоды может быть различным.

2. Существуют различия во влиянии отдельных факторов, регулирующих структурно-функциональные показатели фитопланктона в теплый и холодный период.

3. В разные годы факторы, регулирующие показатели фитопланктона, могут быть разными.

Цель работы – провести комплексное исследование, которое послужило бы основой для анализа изменений фитопланктонного сообщества и влияния факторов среды на сезонную сукцессию и ковариации между структурными и функциональными показателями фитопланктона.

Материалы и методы. Работы были выполнены с января 2014 по январь 2015 года на модельной станции глубиной 5 м, расположенной в Севастопольской бухте с внутренней стороны южного заградительного мола примерно в 300 м от входа в бухту. Наличие мола обусловливает затруднённый водообмен и защиту от волнового воздействия Севастопольской бухты, которая испытывает большую антропогенную нагрузку, в том числе связанную с функционирующим в ней стоком бытовых отходов, уровень которого возрастает в летний период [1]. Не менее чем в 60 м от станции ближе к входу в бухту находится мидийная плантация.

Пробы отбирали в поверхностном слое (0,1 м), как правило, в 10 часов один раз в неделю. Планктонные водоросли имеют короткий жизненный цикл и быстро отвечают на изменение условий среды, поэтому для правильной оценки динамики структурных и функциональных показателей фитопланктона важное значение имеют частота отбора проб и определение наиболее важных факторов, которые могут контролировать фитопланктон.

Видовой состав фитопланктона и численность клеток определяли под световым микроскопом XY–82. Для сгущения пробы применяли метод обратной фильтрации с использованием нуклеопоровых фильтров с диаметром пор 1 мкм (производства г. Дубна, Россия) [2].

Концентрацию хлорофилла *a* и феофитина *a* определяли стандартным флуориметрическим методом [3].

Измерение параметров флуоресценции проводили на приборе «Мега 25» [4], позволяющем определять индукционную кривую, которая характеризуется следующими показателями: начальным уровнем переменной флуоресценции (F_0), максимальным уровнем переменной флуоресценции (F_m). По этим показателям рассчитывали переменную флуоресценцию $F_v=F_m–F_0$ и фотохимическую эффективность фотосистемы 2 (ФС2) F_v/F_m.

Удельную скорость роста фитопланктона определяли с помощью метода разведения проб [5] по суточному увеличению флуоресценции хлорофилла в пробах микропланктона с различным коэффициентом разведения (1, 0, 0, 8, 0, 6, 0, 4, 0, 2).

Температура воды определялась непосредственно в момент отбора пробы. Освещенность измерялась в течение всего светового дня каждый час с помощью люксметра Ю–116. Переходный коэффициент от освещенности в люксах к интенсивности солнечной радиации (ФАР) принимали равным 1000 лк = 20 мкЭ/м^2·с [6]. В пробах определяли гидрохимические параметры: минеральный фосфор – по Морфи и Райли, аммоний – по Гроссгофу-Юхансену, нитраты – восстановлением до нитритов омедненным кадмием с последующим их определением единым «цветным» реактивом, кремнекислоту – по голубому кремнемолибденовому комплексу [7]. Гидрохимические анализы выполнены в аккредитованной на техническую компетентность лаборатории.

Результаты. В течение года зарегистрировано девять типов развития водорослей, которые соответствуют определенным продукционным циклам (ПЦ), имеющим свою продолжительность и амплитуду. ПЦ идентифицировались по вкладу доминирующих видов в общую численность водорослей на максимуме хлорофилла *a* и его концентрации.

Первый ПЦ развития фитопланктона длился месяц и был связан с интенсивным развитием *Emiliania huxleyi*, которая при максимальном содержании хлорофилла достигала 72% от общего числа клеток (рис. 1). Через неделю наблюдался пик численности, в котором *Skeletonema costatum* составила 45%.

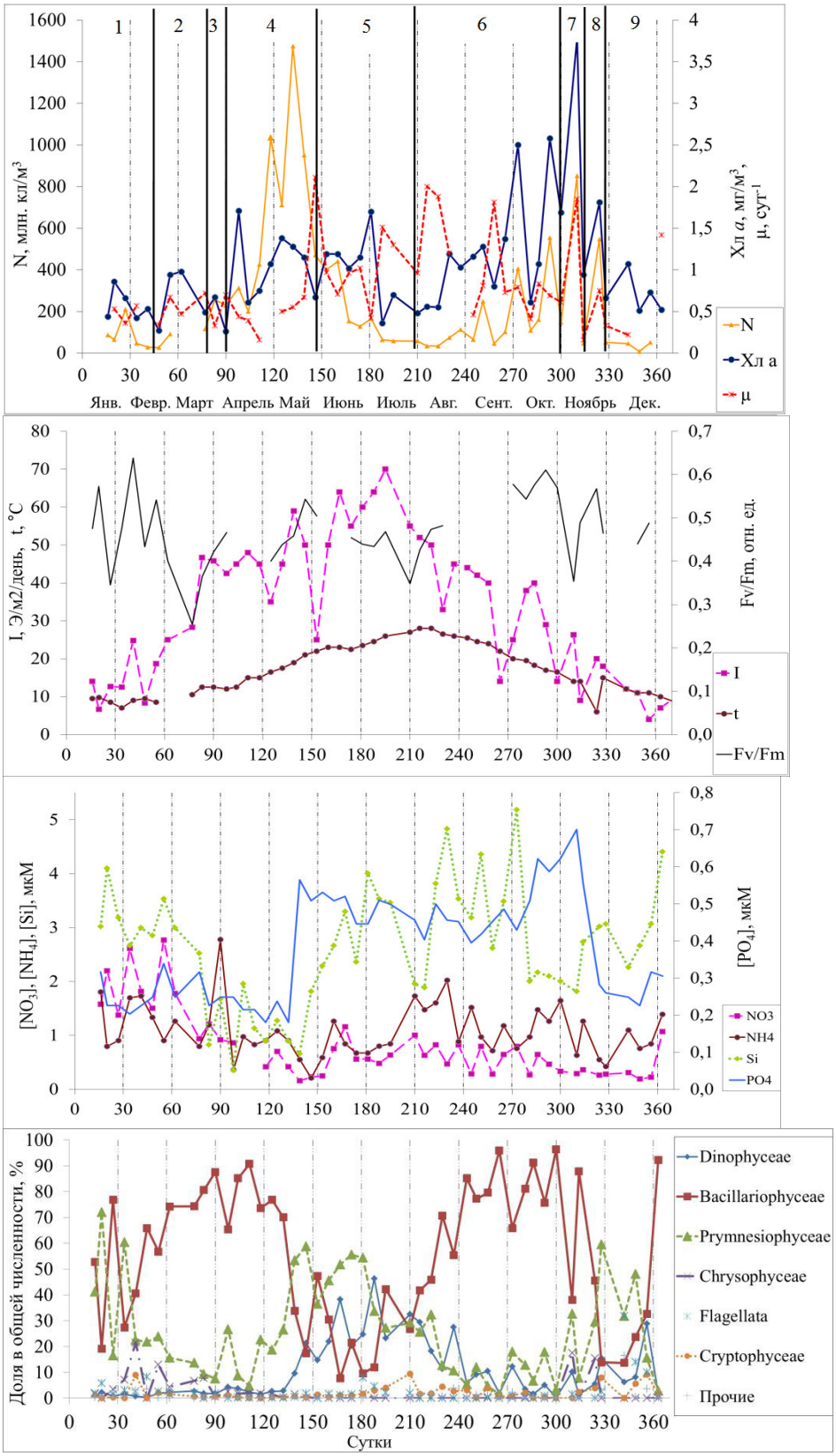


Рис. 1. Сезонная динамика: концентрации хлорофилла *a* (Хл *a*), численности фитопланктона (N), удельной скорости роста (μ), содержания нитратов (NO_3), аммония (NH_4), фосфатов (PO_4), кремния (Si), эффективности ФС2 (F_v/F_m), света (I), температуры (t), а также относительного содержания разных групп водорослей в суммарной численности фитопланктона (%). Сплошными вертикальными линиями обозначены границы ПЦ развития фитопланктона, цифрами – их номера

Следующее значительное увеличение хлорофилла, произошедшее в конце февраля – начале марта, было отмечено развитием *E. huxleyi* (22%) наряду с такими видами как *S. costatum*, *Dinobryon sp*. и *Chaetoceros simplex*, вклад которых в общую численность составлял по 13% для каждого вида.

В конце марта произошла вспышка развития *Chaetoceros socialis* (34%), при этом вклад *E. huxleyi* уменьшился до 14%. Смена доминирующего вида сопровождалась незначительными по амплитуде и совпадающими во времени пиками хлорофилла и численности водорослей.

С начала апреля до конца весеннего периода наблюдалось интенсивное развитие *Pseudonitzshia delicatissima*, которое сформировало два хлорофильных пика. В первом пике наряду с этим видом, давшим 40% общей численности, 36% все еще вносил *Ch. socialis*. Во втором максимуме хлорофилла, при котором также была отмечена наибольшая за все время наблюдений численность водорослей, вклад *P. delicatissima* составлял уже 75%, а субдоминирующим видом была *E. huxleyi* (20%).

У всех выделенных выше ПЦ наблюдалось модальное изменение концентрации хлорофилла и численности водорослей. Как правило, в первые 4–8 суток они достигали своего максимума, а затем в течение 15–30 суток снижались. В этот период наблюдалось повышение доли феофитина (процент от суммы концентраций хлорофилла *a* и феофитина *a*) на 10–15% по сравнению с начальным периодом, что указывает на смертность водорослей, связанную с потреблением фитопланктона зоопланктоном, или естественную гибель клеток. Общая продолжительность развития доминирующих видов составляла в основном 30–50 суток.

Максимальная концентрация хлорофилла увеличивалась к концу весеннего периода. Зимой она составляла 0,86–0,98 мг/м^3, весной – 0,67–1,71 мг/м^3.

Удельная скорость роста фитопланктона в январе-апреле изменялась от 0,33 до 0,72 и в среднем составила 0,52 сут$^{-1}$. В апреле-мае скорость роста варьировала в более широких пределах (0,16–2,11 сут$^{-1}$).

В течение всего зимне-весеннего периода показатель F_v/F_m, отражающий эффективность работы фотосинтетического аппарата водорослей, изменялся от 0,25 до 0,64.

Таким образом, в январе-мае наблюдалась смена доминирующих и субдоминирующих видов, которые формировали вспышки фитопланктона. Продолжительность развития отдельных видов водорослей составляла в основном 30–50 суток. Наиболее высокие величины концентрации хлорофилла, численности водорослей, а также удельной скорости роста зарегистрированы при интенсивном развитии *P. delicatissima*.

В летний период отмечено доминирование по численности ***E. huxleyi***, относительное содержание которой снижалось от начала до конца лета с 57 до 27%. Субдоминирующим видом в июне была *Cyclotella caspia* (в отдельные дни до 45%), в июле представитель динофитовых *Gymnodinium simplex* (до 22%). В начале развития ***E. huxleyi*** отношение между неорганическими соединениями азота и фосфора было равно 0,9, в конце – 6. В это время наблюдалась обратная зависимость между концентрацией хлорофилла и удельной скоростью роста. Максимальные значения скорости роста достигали 2 сут$^{-1}$, минимальные 0,42 сут$^{-1}$. В тоже время фотохимическая эффективность ФС2 составила в среднем 0,46±0,03.

После развития золотистой водоросли в течение двух недель при температуре 27–28°С наблюдалась перестройка фитопланктонного сообщества, в котором роль диатомовых водорослей возросла, но концентрация хлорофилла в этот период не увеличивалась.

Со второй половины августа до конца октября было отмечено 3 синхронных пика хлорофилла и численности, которые формировались за счет диатомовых водорослей. Концентрация хлорофилла достигала 1,3, 2,5, 2,6 мг/м^3 соответственно. В первом и третьем максимумах в фитопланктоне доминантными видами были диатомовые водоросли из рода *Pseudonitzschia*. В первом пике максимальные значения хлорофилла достигались на седьмые сутки, после чего наблюдалось плато, и затем – снижение.

В начале плато диатомеи составляли 11%, а в конце – 65%, причем доля *P. tenuirostris* – 64,6 % от общей численности. Этот же вид составил 24% в третьем пике (конец октября), наряду с *Dactyliosolen fragilissimus* (20%) и *Cerataulina pelagica* (19%). Второй максимум характеризовался кратковременной вспышкой *C. caspia* и *Chaetoceros sp.1*, относительная численность которых составляла 24 и 17% соответственно.

Удельная скорость роста варьировала от 0,41 до 2 сут$^{-1}$, а в среднем составила 1±0,54 сут$^{-1}$. Наибольшие изменения наблюдались в первом и втором пиках, в третьем – они не превышали двух раз.

В течение всего периода фотохимическая эффективность ФС2 в среднем была равна 0,51±0,09.

С конца октября до конца января наблюдалось три ПЦ развития фитопланктона (7–9).

Продолжительность развития водорослей и для седьмого и восьмого ПЦ составляла 2 недели, при этом повышение концентрации хлорофилла от минимума до максимума происходило в течение 10 суток, тогда как снижение – в течение 5 суток. В седьмом ПЦ во время максимального развития водорослей преобладали *C. pelagica* и *D. fragilissimus*, суммарный вклад которых в общую численность был 82%, в восьмом – *Leptocylindrus danicus* (59%). Динамика скорости роста, концентрации хлорофилла и численности водорослей в этот период, в отличие от ранее описанных, совпадала. Значения удельной скорости роста изменялись в широких пределах – от 0,16 до 1,85 сут$^{-1}$.

Несмотря на интенсивное развитие диатомовых водорослей в начале ноября, которое было максимальным в течение года, существенного снижения концентрации кремния не наблюдалось, в то время как концентрация аммония и неорганического фосфора варьировала в более широких пределах.

Продолжительность последнего ПЦ развития водорослей составляла один месяц. Доминирующим видом в этот период была *E. huxleyi*, наибольшая ее доля в общей численности водорослей составила 59% на пике хлорофилла в начале декабря. В этом ПЦ по сравнению с двумя предыдущими появились субдоминирующие виды, представленные динофитовыми *Prorocentrum micans* и *G. simplex*, дающими в отдельные дни до 11% от общего числа клеток.

Таким образом, в годовом цикле развития водорослей наблюдалась постоянная смена доминирующих видов, которые формировали вспышки фитопланктона. В течение года в эволюции фитопланктонного сообщества нами выделено девять ПЦ, которые следовали один за другим. Продолжительность развития водорослей в каждом из них варьировала от 2 недель до 2 месяцев, короткопериодное развитие наблюдалось 3 раза.

Диатомовые водоросли присутствовали в фитопланктоне в течение года. Зимой и весной при температурах 7–19 °С их вклад в суммарную численность был максимальным и составлял в среднем 66±20% (рис. 1), летом при температуре 21–28°С был в 2 раза меньше, а осенью вклад диатомовых опять повышался, достигая значений для зимне-весеннего периода.

Напротив, динофитовые интенсивно развивались в летнее время, а в остальные периоды их численность была низкой.

Примнезиевые водоросли, как и диатомовые, присутствовали в фитопланктонном сообществе весь год. Между относительным содержанием примнезиевых и диатомовых водорослей в суммарной численности фитопланктона наблюдалась обратная зависимость (R^2=0,75). Зимой и летом первые преобладали в фитопланктонном сообществе.

Амплитуда концентрации хлорофилла изменялась от 0,53 до 3,79 мг/м^3. В каждом из ПЦ максимум концентрации хлорофилла достигался в основном через 5–10 суток. Динамика концентрации хлорофилла и численности водорослей в одних типах была одинаковой, в других – различалась.

Из приведенных результатов следует, что для детального описания смены видового состава и вспышек фитопланктона необходим отбор проб не реже одного раза в неделю.

Для анализа действия факторов среды на структурные и функциональные показатели фитопланктона мы разделили

календарный год на теплый и холодный периоды. В холодный период температура была ниже 15°С, в теплый – выше 15°С. Для каждого периода была построена корреляционная матрица (табл. 1). Как в холодный, так и в теплый периоды года достоверная корреляция при уровне значимости 0,95 между исследованными параметрами наблюдалась в 40% случаев.

Относительно высокие коэффициенты корреляции в холодный период наблюдались между изменениями хлорофилла *а* и численностью, скоростью роста, значениями F_0, концентрацией фосфатов и аммония. Между удельной скоростью роста и содержанием фосфатов была получена положительная достоверная зависимость. При уровне значимости 0,90 фотохимическая эффективность ФС2 была связана со светом и температурой, для этих параметров были получены отрицательные корреляции. Между концентрацией биогенных веществ связь отсутствовала. В то время как содержание кремния и фосфатов коррелировало с температурой.

В теплый период изменение концентрации хлорофилла было связано не только со скоростью роста, значением F_0, но и с F_v/F_m, светом и температурой, в то время как связи с биогенными элементами не наблюдалось в отличие от холодного периода. Между хлорофиллом и численностью водорослей коэффициент корреляции (R) был значительно ниже, чем в холодное время года. Относительно высокий коэффициент корреляции наблюдался между скоростью роста и температурой. Если в холодный период для связи удельной скорости роста с хлорофиллом, численностью клеток и величинами F_0 была получена положительная корреляция, то летом она была отрицательной. Высокие значения R были отмечены между фотохимической эффективностью ФС2 и нитратами, фосфатами и светом.

В холодный и теплый периоды параметры внешней среды, контролирующие изменение структурных и функциональных показателей, были различны.

В целом наблюдалась слабая связь между отдельными параметрами среды и структурными и функциональными показателями.

Для анализа совместного действия нескольких факторов на структурные и функциональные показатели рассчитывались уравнения множественной линейной регрессии, в которые включались независимые переменные, оказывающие наибольшее влияние на исследуемые параметры.

Для холодного периода были получены следующие уравнения

$$Хл\ a = 0{,}329 - (0{,}593 \cdot NH_4) + (2{,}993 \cdot PO_4) + (0{,}641 \cdot \mu),\ R^2 = 0{,}73, \quad (1)$$

$$N = -309{,}680 + (40{,}414 \cdot PO_4) + (358{,}163 \cdot \mu) + (603{,}254 \cdot F_0) + (4{,}183 \cdot I),\ R^2 = 0{,}74, \quad (2)$$

$$\mu = 0{,}130 + (0{,}191 \cdot Хл\ a) + (0{,}990 \cdot PO_4),\ R^2 = 0{,}39. \quad (3)$$

Как видно, совместное действие нескольких факторов переменных лучше учитывает изменение структурных и функциональных показателей, чем влияние каждого фактора в отдельности.

Если провести параметризацию коэффициентов уравнений на величину стандартного отклонения, то можно оценить какой из факторов оказывает наибольшее влияние. В первом и третьем уравнениях это будет содержание фосфатов, во втором – флуоресценция при открытых реакционных центрах (F_0).

Аналогичные расчеты были проведены для теплого периода

$$Хл\ a = 0{,}230 - (0{,}454 \cdot \mu) + (3{,}675 \cdot F_v/F_m) - (0{,}00930 \cdot I),\ R^2 = 0{,}55, \quad (4)$$

$$N = -98{,}170 - (548{,}429 \cdot PO_4) - (80{,}574 \cdot Si) - (3{,}942 \cdot t) + (2594{,}195 \cdot F_0),\ R^2 = 0{,}62, \quad (5)$$

$$\mu = -0{,}490 - (0{,}0201 \cdot NO_3) + (0{,}0799 \cdot t) - (0{,}596 \cdot F_0),\ R^2 = 0{,}51, \quad (6)$$

$$F_v/F_m = 0{,}370 + (0{,}0343 \cdot Хл\ a) - (0{,}00167 \cdot NO_3) + (0{,}317 \cdot PO_4) - (0{,}00162 \cdot I),\ R^2 = 0{,}72, \quad (7)$$

где *Хл а* – концентрация хлорофилла *а*, мг/м^3; *N* – численность, млн.кл/м^3; μ – удельная скорость роста, сут$^{-1}$; F_v/F_m – фотохимическая эффективность ФС2, отн. ед.; *I* – свет, Э/м^{2}день; PO_4 – концентрация фосфатов, мкМ; *Si* – концентрация кремния, мкМ; NO_3 – концентрация нитратов, мкМ; NH_4 – концентрация аммония, мкМ; *t* – температура, °С; F_0 – флуоресценция при открытых реакционных центрах, отн. ед.

Таблица 1. Матрица корреляционных связей (R) между структурными, функциональными показателями, а также между ними и параметрами среды в теплый (вверху) и холодный (внизу) период 2014 г.

Теплый период, n = 26

	Хл *a*	**B**	**N**	**NO_3**	**NH_4**	**PO_4**	**Si**	**μ**	**F_v/F_m**	**F_o**	**F_m**	**I**	**t**	
Хл *a*	**1**	0.52	0.28*	-0.14**	0.00**	0.08**	0.21**	-0.47	0.55	0.51	0.74	-0.55	-0.42	**Хл *a***
B	0.90	**1**	0.52	-0.04**	0.03**	-0.04**	-0.39	-0.27*	0.25**	0.46	0.56	-0.23**	-0.47	**B**
N	0.87	0.87	**1**	0.03**	-0.33*	-0.53	-0.59	-0.34	-0.04**	0.72	0.45	-0.05**	-0.66	**N**
NO_3	-0.16**	-0.07**	-0.01**	**1**	-0.08**	-0.39	-0.21**	-0.31*	-0.40	0.31*	-0.03**	0.07**	-0.31*	**NO_3**
NH_4	-0.51	-0.25**	-0.28*	0.02**	**1**	0.12**	0.18**	-0.05**	-0.02**	-0.36	-0.22**	-0.28*	0.27*	**NH_4**
PO_4	0.68	0.76	0.54	-0.21**	-0.14**	**1**	0.29*	0.24**	0.64	-0.43	0.16**	-0.09**	0.27*	**PO_4**
Si	-0.20**	-0.20**	-0.33*	-0.08**	0.19**	0.004**	**1**	0.17**	0.23**	-0.40	-0.10**	-0.06**	0.60	**Si**
μ	0.59	0.74	0.58	-0.14**	-0.001**	0.57	0.15**	**1**	0.03**	-0.56	-0.43	0.26*	0.60	**μ**
F_v/F_m	-0.08**	-0.26**	-0.24**	0.23**	0.06**	-0.18**	0.22**	-0.21**	**1**	-0.01**	0.66	-0.58	-0.29*	**F_v/F_m**
F_o	0.75	0.64	0.57	-0.39	-0.57	0.64	-0.34*	0.49	-0.19**	**1**	0.72	-0.33*	-0.74	**F_o**
F_m	0.56	0.33*	0.24**	-0.18**	-0.61	0.43	-0.03**	0.24**	0.45	0.74	**1**	-0.60	-0.73	**F_m**
I	0.14**	0.16**	0.42	0.39	0.09**	-0.12**	-0.61	-0.03**	-0.30*	0.07**	-0.29*	**1**	0.37*	**I**
t	0.24**	0.27**	0.13**	0.07**	-0.19**	0.37	-0.49	-0.04**	-0.32*	0.47	0.13**	0.35	**1**	**t**

Холодный период, n = 23

Обозначения те же, что и на рис. 1, кроме **B** – биомасса, мг/м^3, **F_0** – флуоресценция при открытых реакционных центрах, отн. ед., **F_m** – максимальный уровень переменной флуоресценции, отн. ед., **I** – интенсивность солнечной радиации, Э/м^2·день, **t** – температура воды, °С, **n** – количество дней, в которые проводились измерения.

** - недостоверные значения при α = 0,05; * - недостоверные значения при α = 0,1.

Содержание фосфатов в наибольшей степени влияло на концентрацию хлорофилла *a* и скорость роста в холодный период, и на фотохимическую эффективность ФС2 в теплый. В теплый период года основным фактором, влияющим на содержание хлорофилла, был F_v/F_m. Изменение численности клеток в оба периода было связано с величинами F_0. Этот же фактор вносил наибольший вклад в изменчивость величин скорости роста в теплый период, в отличие от холодного.

Таким образом, в холодный и теплый периоды изменение всех исследованных параметров, кроме численности клеток, было связано с разными факторами. В целом уравнения множественной регрессии позволяют учесть 40–75% изменчивости исследованных параметров. Можно предположить, что неучтенная изменчивость (25–60%) зависит от нерассмотренных нами факторов, которые могут быть связаны с биологическими циклами развития отдельных видов водорослей.

Обсуждение. Регулярные исследования фитопланктонного сообщества Севастопольской бухты были начаты Н.В. Морозовой-Водяницкой в 1937 г. [8]. С тех пор фитопланктон изучался многими исследователями. Было показано, что количество видов в планктоне варьирует в разные годы от 150 до 200 [8–10]. В течение года в бухте наблюдается сезонная сукцессия фитопланктона. Зимой, весной и осенью доминируют диатомовые, летом – динофитовые, хотя и не каждый год. В январе-феврале регулярно наблюдается интенсивное развитие *S. costatum*, а в апреле-мае – различных видов из рода *Chaetoceros*. В летнее время в зависимости от климатических условий диатомовый комплекс может оставаться доминирующим или уступать первое место динофитовым водорослям [8]. Описанная схема изменения видового состава фитопланктона повторяется как в наших, так и в других исследованиях, проведенных в Севастопольской бухте в течение нескольких десятилетий, хотя в отдельные годы возможны отклонения.

Следует отметить, что в ранее проведенных исследованиях [9–11] отбор проб проводился один или два раза в месяц, и есть вероятность, что кратковременные вспышки в развитии фитопланктона могли быть пропущены. В наших исследованиях отбор проб проводился более часто, что позволило учесть ПЦ развития доминирующих видов фитопланктона разной продолжительности. Мы выделили девять циклов с продолжительностью развития от 0,5 до 2 месяцев. В холодный период наблюдалось больше двухнедельных циклов развития, чем в теплое время года. В целом холодный период характеризуется более быстрой сменой доминирующих видов, которая сопровождалась резкими изменениями температурного и светового режимов. Так, отмеченные в конце октября и середине ноября максимумы концентрации хлорофилла сопровождались снижением температуры на 2 и 8°С и увеличением интенсивности света в 2 и 3 раза соответственно.

В ранних исследованиях считалось, что температура является фактором, определяющим смену видового состава диатомовых и динофитовых. Однако, как видно из приведенных выше результатов, диатомовые в Севастопольской бухте присутствуют в течение года, а некоторые из них развиваются при высокой температуре. Возможно, что температурные условия определяют встречаемость отдельных видов водорослей, но некоторые из них (*Pseudonitzschia*) высокопластичны и способны развиваться во всем диапазоне температур, которые наблюдаются в Севастопольской бухте. Биогенные вещества могут ограничивать развитие как отдельных видов водорослей, так и фитопланктонного сообщества в целом. Считается, что для интенсивного развития диатомовых водорослей необходимы высокие концентрации нитратов, тогда как динофитовые активно развиваются в присутствии аммония [12]. В Черном море константы полунасыщения Михаэлиса-Ментен для нитратов составляют в среднем весной и осенью 0,15±0,05 мкМ, летом 0,09±0,06, для аммония весной 0,25±0,07 мкМ и летом 0,12±0,03 [13]. В Севастопольской бухте

концентрации этих соединений находились выше указанных величин. Это справедливо также в отношении содержания фосфатов [14].

В Севастопольской бухте интенсивное развитие *E. huxleyi* наблюдалось зимой и летом, и она развивалась в противофазе с диатомовыми водорослями. Некоторые авторы считают, что развитие *E. huxleyi* регулируется содержанием фосфатов [15] на том основании, что в восточной части моря доля золотистых водорослей в общей биомассе фитопланктона увеличивалась при повышении фосфатов и снижении отношения N/P. В этих исследованиях измерения биомассы фитопланктона и питательных веществ проводились не всегда одновременно. В наших исследованиях массовое развитие *E. huxleyi* зимой и летом также сопровождалось увеличением содержания фосфатов и снижением отношения N/P. В то же время коэффициент переменной флуоресценции и скорость роста в это время изменялись слабо. Изменение соотношения диатомовых и кокколитофорид может быть связано не только с влиянием фосфатов, но и с тем, что диатомовые водоросли потребляются зоопланктоном более активно, чем кокколитофориды [16]. В целом *E. huxleyi* характеризуется высокой пластичностью, что позволяет ей присутствовать в фитопланктоне в течение всего года.

Заключение. В течение года наблюдается сезонная сукцессия фитопланктона. Зимой развиваются примнезиофитовые и диатомовые водоросли, весной и осенью – диатомовые, летом – кокколитофориды и динофитовые. Максимумы численности водорослей и концентрации хлорофилла *a* в основном формируются либо одним, либо двумя-тремя доминирующими видами.

Исследования, проведенные на модельной станции в Севастопольской бухте, позволили выявить несколько циклов в развитии фитопланктона в течение года продолжительностью от 0,5 до 2 месяцев. В холодный период наблюдалось больше двухнедельных циклов развития и более быстрая смена доминирующих видов, чем в теплое время года.

Показано, что совместное действие нескольких факторов оказывает более сильное действие на структурные и функциональные показатели фитопланктона, чем каждый фактор в отдельности. В теплый и холодный периоды года развитие фитопланктонного сообщества контролируется разным сочетанием факторов.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 16-05-00076 «Альтернативный подход к оценке биомассы и скорости роста фитопланктона в Черном море с использованием спутниковых данных».

Авторы выражают искреннюю благодарность м.н.с. отдела аквакультуры и морской фармакологи ИМБИ РАН Родионовой Н.Ю. за выполнение гидрохимических анализов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гидрохимическая* характеристика отдельных бухт Севастопольского взморья / Е.А. Куфтаркова, Н.Ю. Родионова, В.И. Губанов [и др.] // ЮГНИРО. Основные результаты комплексных исследований в Азово-Черноморском бассейне и Мировом океане. 2008. Т. 46. С. 110–117.

2. *Суханова И.Н.* Концентрирование фитопланктона в пробе // Современные методы количественной оценки распределения морского планктона. М.: Наука, 1983. С. 97–105.

3. *Protocols* for the joint global ocean flux study (JGOFS) core measurements. Reprint of the IOC Manuals and Guides No. 29, UNESCO 1994 / A. Knap, A. Michaels, A. Close, [et al.] // JGOFS Report Nr. 19. 1996. P. 119–122.

4. *Применение* флуориметра «Мега-25» для определения количества фитопланктона и оценки состояния его фотосинтетического аппарата / С.И. Погосян, С.В. Гальчук, Ю.В. Казимирко [и др.] // Вода: химия и экология. 2009. №. 2. С. 34–40.

5. *Парсонс Т.Р.*, *Такахаши М., Харгрейв Б.* Биологическая океанография.

М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. С. 89–91.

6. *Landry M.R., Hassett R.P.* Estimating the grazing impact of marine microzooplankton // Marine biology. 1982. Т. 67. №. 3. P. 283–288.

7. *Орадовский С.Г.* Руководство по химическому анализу морских вод (РД52. 10.243-293). СПб: Гидрометеоиздат, 1993. 264 с.

8. *Морозова-Водяницкая Н.В.* Фитопланктон Черного моря. I. Фитопланктон в районе г. Севастополя и общий обзор фитопланктона Черного моря // Тр. Севастоп. биол. ст. АН СССР. 1948. Т. 6. С. 39–172.

9. *Биологическое* разнообразие микропланктона прибрежной зоны Черного моря в районе Севастополя (2001–2003 гг.) / И.Г. Поликарпов, М.А. Сабурова, Л.А. Манжос [и др.] // Современное состояние биоразнообразия прибрежных вод Крыма (черноморский сектор) / Под ред. В.Н. Еремеева, А.В. Гаевской. НАН Украины, ИнБЮМ. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. 2003. С. 16–43.

10. *Сеничева М.И.* Сезонная динамика численности, биомассы и продукции фитопланктона Севастопольской бухты // Экология моря. 1980. Вып. 1. С. 3–11.

11. *Стельмах Л.В.*, *Губанов В.И., Бабич И.И.* Сезонные изменения скорости роста и лимитирование фитопланктона питательными веществами в прибрежных водах Черного моря в районе Севастополя // Морской экологический журнал. 2004. Т. 3. № 4. С. 55–73.

12. *Кривенко О.В.* Содержание и потребление неорганических соединений азота в Чёрном море // Морской экологический журнал. 2008. Т. 7. № 4. С. 13–26.

13. *Финенко З.З.*, *Крупаткина Д.К.* Первичная продукция и размерная структура фитопланктона в зимне-весенний период // Планктон Черного моря. Киев. 1993. Гл. 2. С. 74–92.

14. *Пархоменко А.В.* Сезонная изменчивость поглощения минерального фосфора микропланктоном в глубоководной области Черного моря // Морской экологический журнал. 2009. Т. 8. №. 2. С. 5–23.

15. *Alternation* of diatoms and coccolithophores in the north-eastern Black Sea: a response to nutrient changes / A. Mikaelyan, L. Pautova, V. Chasovnikov, S. Mosharov , [et al.] // Hydrobiologia. 2015. Т. 755. №. 1. P. 183–196

16. *Olson M.B., Strom S. L.* Phytoplankton growth, microzooplankton herbivory and community structure in the southeast Bering Sea: Insight into the formation and temporal persistence of an *Emiliania huxleyi* bloom // Deep-Sea Res., 2002. Vol. 49 (II). P. 5969–5990.

SEASONAL DYNAMIC OF STRUCTURAL AND FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF THE PHYTOPLANKTON COMMUNITY IN THE SEVASTOPOL BAY

Z.Z. Finenko, L.V Stelmakh., I.M. Mansurova, E.Ju. Georgieva, V.S. Tsilinsky

Institute of Marine Biological Research of RAS, Russian Federation, Sevastopol, Nachimov Av., 2

The study of phytoplankton community in Sevastopol Bay including structural, functional characteristics and the main environmental factors a week apart during a year was carried out. The seasonal change of algae species composition was described and nine of the production cycles were registered with duration between 0,5–2 months. It was shown that the environmental factors that control the structural and functional indices in warm and cold periods were different. Individual factors regulate the phytoplankton production characteristics to a lesser extent than their joint action.

Key words: phytoplankton, chlorophyll *a*, algae abundance, specific growth rate, coefficient of phytoplankton photo system efficiency, nutrients.

УДК 551.465.553

ДОЛГОПЕРИОДНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВЕТРОВОЙ ОКЕАНИЧЕСКОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В ДВУХСЛОЙНОМ ОКЕАНЕ

А.Б. Федотов

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: fedotov57@mail.ru

В рамках численной модели двухслойного океана в условиях внешнего стационарного потока завихренности и постоянных параметров диссипации проведено исследование развития крупномасштабной циркуляции, выявлен механизм долгопериодных осцилляций энергии течений, проанализированы характерные особенности крупномасштабной циркуляции в режиме осцилляций.
Ключевые слова: синоптическая изменчивость, струйные течения, ветровые течения.

Введение. Динамика крупномасштабной океанической циркуляции, ее отдельные аспекты исследуются многими авторами с применением различных методов анализа, в частности, изучается взаимодействие высоких бароклинных мод и их влияние на динамику океана в средних широтах [1], взаимодействие океанической циркуляции с атмосферой [2]. Исследования проводятся с помощью полных моделей океанической циркуляции [3, 4], учитывающих все многообразие факторов, имеющих существенное влияние на циркуляцию океана. Большое внимание исследователи уделяют задачам изучения крупномасштабной циркуляции под действием касательного напряжения ветра, в которых влияние потоков тепла и соли не играет решающей роли в процессе формирования структуры течений и которыми можно пренебречь. Это, прежде всего, задачи исследования геострофических течений открытого океана и задачи динамики интенсивных пограничных течений у западных берегов океанов.

Важным направлением изучения океана является исследование океанских течений, их неустойчивости, а также возможности возникновения структурных образований, изучение их характерных пространственно-временных масштабов, их роли в процессах переноса массы, импульса, энергии в океане.

Хорошо известно, что океаническая циркуляция описывается преимущественно баротропной и первой бароклинной модой, при том, что значительная энергия течений имеет модовый состав более высокого порядка, доля этой энергии достаточно быстро убывает с ростом номера моды, в частности, ряд исследователей проводят сравнительные численные эксперименты с использованием 3-х, 6-ти и 12-слойных моделей [5].

Настоящая работа посвящена исследованию эволюции океанических течений в рамках классической квазигеострофической вихреразрешающей численной двухслойной модели циркуляции под воздействием стационарного пространственно неоднородного ветра. Целью работы является исследование механизмов формирования в поле течений статистически значимых структурных образований, изучение их пространственных и временных характеристик, а также в перспективе оценка возможности оказывать влияние этих образований на термодинамические процессы в атмосфере.

Уравнения и описание модели. В работе использована модель эволюции потенциального вихря [6] в двухслойной жидкости для случая равной глубины каждого из слоев.

$$\frac{\partial \omega_j}{\partial t} + \Im\left(\psi_j, \omega_j\right) + \beta\frac{\partial \psi_j}{\partial x} = D_j + W_j, \quad (1)$$

$$\omega_j = \Delta\psi_j + \mathrm{F}\left(\psi_i - \psi_j\right), \ \mathrm{i}=3-j, \quad (2)$$

где ψ_j – поле функции тока в слое j, а

ω_j – поле завихренности в слое j; D_j – диссипация; W_j поток завихренности, генерируемый ветром. Здесь использованы общепринятые обозначения $F^{-1/2}$ – внутренний масштаб Россби, β – меридиональный градиент параметра Кориолиса.

Диссипация в модели реализована посредством включения в расчетную схему обычной вязкости, для нижнего слоя также используется придонное трение. Уравнения модели были стандартным образом приведены к безразмерному виду, и расчеты выполнялись в квадратной области с длиной стороны 2π. Положительные значения оси X соответствуют направлению на восток, положительные значения оси Y соответствуют направлению на север. Поток завихренности, поступающей в верхний слой

$$W_1 = -W_0 sin(x/2) sin(y),$$

где W_o – амплитуда потока завихренности, таким образом, южная половина расчетной области подвергается воздействию антициклонической завихренности, а северная половина – циклонической, поток ветровой завихренности в нижний слой соответственно постановке задачи тождественно равен нулю.

В модели ставятся граничные условия непротекания.

Численная схема. При выборе численной схемы было отдано предпочтение конечно-разностным методам интегрирования уравнений задачи, это связано с перспективой развития модели. Прежде всего, модель должна легко модифицироваться из двухслойной в многослойную с произвольным числом слоев, описывать геострофические течения при наличии рельефа дна, а также под действием неоднородного и нестационарного ветра.

Для решения основного уравнения задачи (1) применена схема Аракавы [7]. Эта девятиточечная схема имеет формальную погрешность пространственной аппроксимации четвертого порядка точности, производная по времени аппроксимируется по схеме *leapfrog* или «чехарда». Данная схема обладает свойством сохранения завихренности и интегралов движения второго порядка – кинетической энергии и энстрофии, что делает эту схему удобной при решении задач гидродинамической неустойчивости. Эта схема с успехом применялась в соавторстве в задачах исследования негауссовых процессов в геострофической турбулентности [8].

Сравнение данной схемы со схемой CABARET [9] отдает предпочтение последней для расчетных областей с числом узлов 257 и менее, что было учтено в данной работе.

Решение системы уравнений (2) на каждом шаге выполнялось с помощью прямого метода интегрирования путем разложения полей функции тока и относительной завихренности по собственным функциям дифференциального оператора задачи для прямоугольных (квадратных) областей [10].

Результаты численных экспериментов. Численные эксперименты выполнялись в квадратной расчетной области с разрешением 513 узлов сетки по каждой из сторон квадрата. Ниже представлены результаты экспериментов при безразмерных параметрах $\beta = 1$ и $F = 1500$, шаг по времени был равен 0,05 безразмерной единицы.

Если размер расчетной области по аналогии с [5] принять равным 3840 км, то масштаб длины L = 611 км, тогда, принимая $\beta = 2{,}0 \times 10^{-11}$ м$^{-1}$с$^{-1}$, масштаб скорости равен U = 7,46 м/с, а масштаб времени T = 0,95 суток. Ниже приводятся поля течений только для верхнего слоя как более показательные. Как уже было указано выше, расчеты выполнялись с использованием вязкости в качестве диссипативного члена уравнения (1), значения безразмерного коэффициента вязкости для обоих слоев i = 1,2 были выбраны в трех описанных ниже численных экспериментах равными 0,000035; 0,00003 и 0,00002.

Постоянный поток завихренности в верхний слой жидкости и постоянные в ходе каждого из экспериментов коэффициенты вязкости и донного трения обеспечивают постоянный приток энергии в систему и стабильный режим диссипации. При таких условиях в качестве основного индикатора состояния системы геострофических течений была выбрана

полная удельная энергия течений как сумма кинетических энергий каждого из двух слоев и доступной потенциальной энергии, приведенная к единице площади расчетной области.

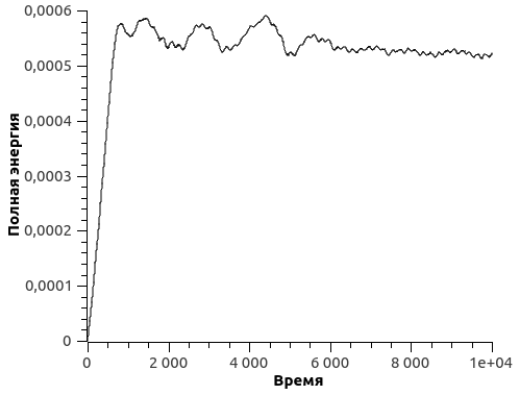


Рис. 1. Временной ход полной удельной энергии для расчетов с безразмерным коэффициентом вязкости 0,000035

Как видно из рис. 1., полная энергия быстро нарастает и после осцилляций незначительной амплитуды после 6000 единиц времени выходит на асимптотический режим с энергией приблизительно равной 0,0005, что соответствует средней скорости равной 17 см/с. Аналогичные результаты ранее были получены в [5].

Уменьшение коэффициента вязкости, а, следовательно, смещение диссипативного интервала в сторону больших волновых чисел качественно меняет поведение геострофических течений.

На рис. 2 и 3 приведены временные ходы полной удельной энергии для меньших коэффициентов вязкости.

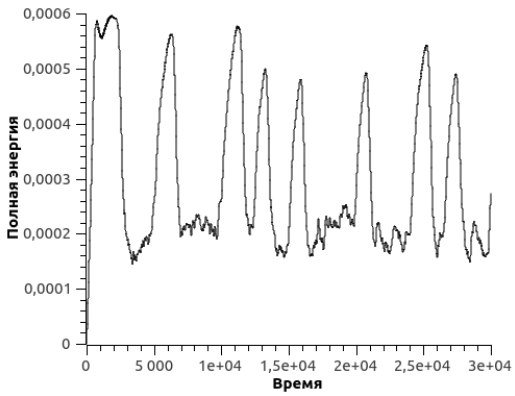


Рис. 2. Временной ход полной удельной энергии для расчетов с безразмерным коэффициентом вязкости 0,00003

Из рис. 2 видно, что в ходе эволюции величина полной энергии испытывает осцилляции с перепадом значений приблизительно в 2,5 раза, возникающие пики энергии во временном ходе имеют продолжительность от 2000 до 3000 единиц времени.

Рассмотрим результаты моделирования с еще меньшей вязкостью

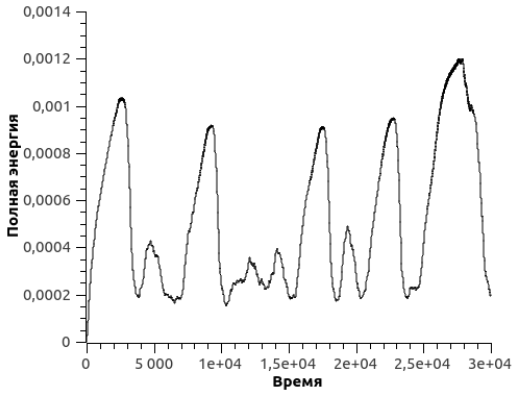


Рис. 3. Временной ход полной удельной энергии для расчетов с безразмерным коэффициентом вязкости 0,00002

Рис. 3 демонстрирует еще более мощные пики энергии как по амплитуде, так и по продолжительности, так, последний, приведенный на рис. 3, пик имеет продолжительность около 5000 единиц времени.

Появление подобных пиков временного хода энергии является фактом нетривиальным, поскольку, как уже отмечалось выше, поток энергии в систему геострофических течений постоянен, следовательно, накопление энергии с последующим быстрым стоком последней при постоянном коэффициенте вязкости может быть связан исключительно с явлением блокировки турбулентного каскада таким образом, что значительная доля энергии просто не поступает в интервал волновых чисел, в котором диссипация существенна. И наоборот, наступает режим, при котором энергия интенсивно поступает в коротковолновый диапазон, интенсивно диссипируя.

Для дальнейшего анализа ситуации целесообразно перейти к анализу собственно геофизических полей, рассчитываемых в эксперименте. Следует обратить внимание на поля относительной завихренности, анализ полей данной ве-

личины здесь более информативен нежели анализ полей функции тока, представляющих собой два крупных круговорота циклонического в северной части расчетной области и антициклонического в ее южной части.

Ниже приведены поля завихренности для верхнего слоя в эксперименте с наименьшей вязкостью для 15000, 16000 и 17000 единиц времени, из графика на рис. 3 видно, что данные моменты времени соответствуют эволюции системы течений при минимуме энергии, в стадии роста энергии и в максимуме соответственно.

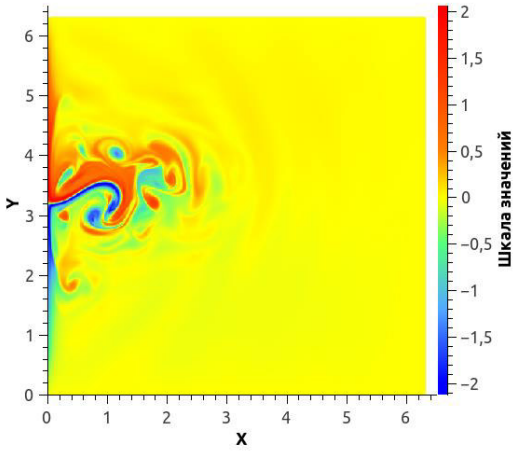


Рис. 4. Поле относительной завихренности в верхнем слое для $t = 15000$

Поле завихренности демонстрирует струйное течение незначительной протяженности в зональном направлении, окруженное нерегулярно расположенными циклоническими и антициклоническими вихрями.

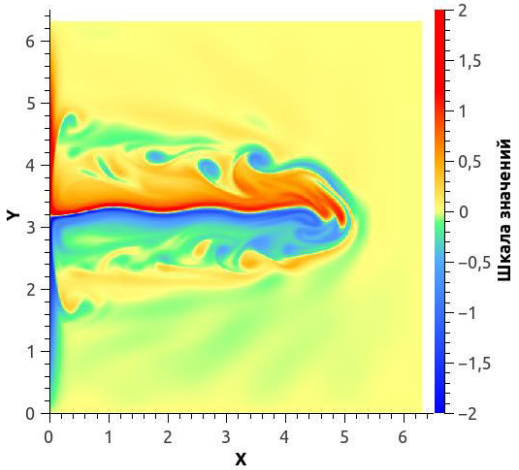


Рис. 5. Поле относительной завихренности в верхнем слое $t = 16000$

Здесь представлена стадия формирования интенсивного струйного зонального течения, на восточном конце которого происходит формирование интенсивных вихрей, причем к северу от струи в зоне потока ветровой циклонической завихренности формируются вихри антициклонической завихренности, перемещающиеся в западном направлении. Поскольку эти вихри движутся в поле сдвигового течения, их динамика является достаточно сложной, т.к. определяется помимо бета-эффекта структурой сдвигового течения.

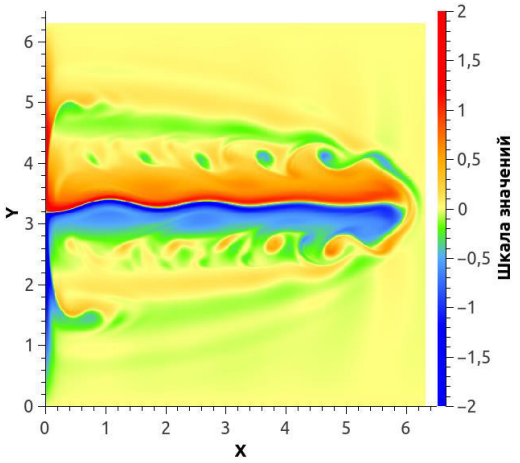


Рис. 6. Поле относительной завихренности в верхнем слое $t = 17000$

На рис. 6 представлено поле завихренности при максимальном развитии струйного течения, видны две упорядоченные вихревые дорожки. В частности, хорошо просматривается сам процесс вихреобразования в результате бароклинной неустойчивости: на восточном конце струйного течения водные массы циклонической завихренности, находившиеся к северу от струи, огибают зону антициклонической завихренности и, смещаясь к югу, формируют интенсивный циклон. Аналогичный процесс с образованием интенсивного антициклона виден на рис. 5.

К моменту времени $t = 18500$ интенсивная струя распадается с формированием вихревого поля, качественно аналогичного представленному на рис. 4. Формат данной статьи не позволяет представить поля течений с высокой

дискретностью по времени для детальной иллюстрации описанного процесса формирования и распада струйного течения, следует отметить, что этот процесс повторяется от слабовыраженного струйного течения к интенсивной струе, генерирующей вихревые цепочки с последующим распадом струи.

Заключение. В настоящей работе представлены результаты численного моделирования океана на стадии развития поля течений от начального состояния полного покоя под действием вынуждающей силы ветра. В работе описан квазипериодический процесс самопроизвольной генерации интенсивной струи с ее последующим распадом, время, в течение которого система эволюционирует от одного локального минимума энергии до другого, можно рассматривать как время «жизни» интенсивной зональной струи, как отмечалось выше, это время достигало в описываемом эксперименте до 5000 единиц времени, что в терминах выбранных масштабов соответствует приблизительно 13 годам реального времени. При этом характер описанного явления таков, что в ходе развития и распада интенсивной струи кардинальным образом изменяется режим крупномасштабных процессов переноса, что может рассматриваться как гидродинамический механизм долгопериодных колебаний переноса массы, импульса, энергии, тепла и соли в океане.

Таким образом, в системе интенсивное струйное течение – вихри наблюдаются два квазипериодических процесса. Первый связан с поочередной генерацией циклонических и антициклонических вихрей как проявление бароклинной неустойчивости в районе восточного конца струйного течения, которые затем выстраиваются в вихревые цепочки из вихрей, движущихся в западном направлении. В процессе своего движения на запад эти вихри ослабевают и поглощаются у западного берега крупномасштабным течением, этот процесс относительно высокочастотный и его условно можно называть связанным с «локальной» неустойчивостью.

Квазипериодический процесс усиления и ослабевания собственно зонального струйного течения, сопровождающийся накоплением значительного количества энергии в струе, является долгопериодным, ярко выражен в поле завихренности как качественно, так и количественно, перепад уровня энергии в состоянии распавшейся струи и в состоянии максимально развитой зональной струи достигает величины 0,25. Учитывая, что доступная потенциальная энергия в таком течении гораздо меньше кинетической, средняя величина скорости фактически в 2 раза больше в случае развитого зонального струйного течения по сравнению с состоянием распавшейся струи. В данном случае неустойчивость приводит к деформации и распаду всей зональной струи, последствия такой неустойчивости по пространственным характеристикам можно отнести к глобальным, и здесь, следует говорит уже о «нелокальной» неустойчивости.

Это обстоятельство и позволяет отметить важную роль описанного выше механизма в формировании долгопериодных колебаний переноса тепла и соли в океане.

Принципиальным здесь является то обстоятельство, что данный эффект является нелинейным, и есть все основания, чтобы его рассматривать как квазипериодическую генерацию и распад диссипативных структур, при этом характерное время существования такой структуры не имеет отношения к периодам малых собственных колебаний, известных в геофизической гидродинамике, подчеркнем особо, что внешнее воздействие на исследуемую систему было стационарным во времени и не могло генерировать вынужденные колебания какого-либо периода, также здесь отсутствовали причины возникновения параметрического резонанса.

Необходимо отметить, что характерные особенности описанного явления достаточно сильно зависят от выбора коэффициента вязкости. Увеличение коэффициента вязкости представляется нецелесообразным из-за того, что вяз-

кость начинает оказывать существенное влияние на процессы на масштабах радиуса деформации Россби. Уменьшение вязкости приводит к искажению процесса эволюции интенсивного течения из-за того, что струя достигает восточного берега расчетной области, в результате на исследуемый процесс накладывается явление взаимодействия интенсивной струи с берегом, что на данном этапе исследования выходит за пределы поставленной задачи.

Перспективность дальнейших исследований связана, прежде всего, с применением бигармонической вязкости, с исследованием системы под действием нестационарного ветра, с исследованием ветровых течений в океане с неравной толщиной слоев, в многослойном океане.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shevchenko I.V., Berloff P.S.* Multi-layer quasi-geostrophic ocean dynamics in Eddy-resolving regimes // Ocean Modelling 94 (2015), 1–14.
2. *Hogg A. et al.* The effect of mesoscale ocean-atmosphere coupling on the large ocean circulation // J. Climate. 2009, 22 (15), 4066–4082.
3. *Treguier A.M. et al.* Meridional transport of salt in the global ocean from an reddy-resolving model // Ocean Sci. 2014, 10, 243–255.
4. *Gula J., Molemaker M.J., McWilliams J.C.* Gulf stream dynamics along the southeastern u.s. seaboards // J. Phys. Oceanogr., 2015, 45 (3), 690–715.
5. *Shevchenko Igor, Berloff Pavel.* On the role of baroclinic modes in eddy-resolving midlatitude ocean dynamics // Ocean Modelling, 111 (2017), 55–65.
6. *Rhines P.B.* Geostrophic turbulence // Ann. Rev. Fluid Mech. 1979. V. 11. P. 401–441.
7. *Arakawa A.* Computational design of longterm numerical integration of the equations of fluid motion. 1. Two-dimensional incompressible flow // Journal of Comput. Physics. V. 1. № 1. P. 119–143.
8. *Ларичев В.Д., Федотов А.Б.* Явление самоорганизации в геострофической турбулентности на β-плоскости // Доклады АН СССР, 1988. Т. 298. № 4. С. 971–975.
9. *Karabasov S.A., Berloff P.S., Goloviznin V.M.* CABARET in the ocean gyres // Ocean Modelling, 2009. 30 (2-3), 155–168.
10. *Роуч П.* Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 618 с.

LONG-TERM VARIABILITY OF OCEANIC CIRCULATION FORCED BY THE STATIONARY WIND IN A TWO-LAYER OCEAN

A.B. Fedotov

Institute of Natural and Technical Systems, Russian Federation, Sevastopol, Lenin St., 28

Using numerical simulation of two-layer ocean under the outer stationary vorticity flux and constant dissipation factors the investigation of the development of a large-scale circulation has been provided, there has been discovered the long-term energy oscillations mechanism. There have been analyzed the characters of large -scale circulation under the oscillation regime.

Keywords: synoptic variability, large-scale variability, wind-forced currents.

УДК 551.583.13

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ АНОМАЛИИ В ЧЕРНОМОРСКОМ РЕГИОНЕ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ СОБЫТИЯМИ ЭЛЬ-НИНЬО И ЛА-НИНЬЯ

О.Ю. Коваленко, Е.Н. Воскресенская

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: kovalenko_olga89@mail.ru, elena_voskr@mail.ru

В статье исследуются особенности проявления разных типов событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья в аномалиях температуры воздуха и числе экстремально холодных дней в Черноморском регионе за период 1900–2005 гг. Проведен композитный анализ и выявлены различия между типами событий для характеристик температуры воздуха в течение года Эль-Ниньо / Ла-Нинья («0» год) и в год, следующий за событием («+1» год).
Ключевые слова: аномалия температуры, число дней с экстремально холодной температурой, процентиль, Ла-Нинья, Эль-Ниньо, Черноморский регион

Введение. В общем смысле под явлениями Эль-Ниньо (ЭН) и Ла-Нинья (ЛН) понимают соответствующие положительные и отрицательные аномалии температуры поверхностных вод в экваториальной части Тихого океана. При этом происходят изменения в поле давления, которые оказывают влияние на глобальную структуру полей температуры и осадков [1].

Одними из наиболее ярких проявлений событий ЭН и ЛН являются аномалии температурного режима: засухи и морозы. Примером могут служить аномальные погодные условия 2015–2016 гг., обусловленные одним из самых сильных за последние 65 лет событием ЭН [2]. Результаты по исследованию влияния явлений ЭН и ЛН на отдельные гидрометеорологические характеристики опубликованы в ряде работ и охватывают отдельные регионы Земного шара, включая Европейскую часть России. Например, в [3] получены обобщающие результаты проявлений ЭН и ЛН в аномалиях температуры и осадков по всей территории России. В [4] проанализирован характер аномалий температуры в годы ЭН, ЛН для Евразии. Однако в приведенных работах не учитываются особенности каждого события в отдельности.

В то же время подобных работ для региона Черного моря мало. Здесь можно выделить лишь работы [5, 6], где приведены результаты проявлений ЭН не только для Атлантико-Европейского региона, но и для Черноморского региона. Причем авторы подразделяют события ЭН на несколько типов, которым свойственны разные проявления в гидрометеохарактеристиках.

В настоящее время существует несколько классификаций событий ЭН и ЛН, в соответствии с которыми указанные явления подразделяются на два – три типа и сопровождаются разными откликами в гидрометеорологических полях [6 – 10]. Однако до сих пор не существует комплексного описания отклика разных типов событий ЭН и ЛН на аномалии температуры в Черноморском регионе. Ведь, как известно, указанный регион характеризуется уникальными географическими особенностями. В настоящей работе особенное внимание уделяется экстремальным величинам температуры воздуха, т.к. они непосредственно влияют на состояние здоровья людей, показатели загрязнения воздуха, агропромышленный комплекс и другие отрасли экономики региона.

Целью настоящей работы является анализ изменений аномалий температуры воздуха (ЭТВ) и числа дней с экстремально холодными температурами в связи с событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья за период с конца XIX по начало XXI столетия. Необходимо сразу отметить, что результаты по изменению числа дней с экстремально высокой температурой воздуха в связи с ЭН и ЛН и их обсуждение в статье не приводятся, т.к. они не значительные.

Данные. В работе использованы данные наблюдений за среднесуточной температурой воздуха на 6 станциях Черноморского региона за период 1900–2005 гг. Массив доступен на сайте [11]. Координаты станций представлены в табл. 1.

Таблица 1. Географические координаты станций Черноморского региона

Станция	Широта	Долгота
Ай-Петри	44°28'	34°04'
Геническ	46°10'	34°49'
Одесса	46°26'	30°46'
Симферополь	44°41'	34°08'
Сочи	47°15'	39°45'
Феодосия	45°02'	35°23'

Анализ временных рядов среднесуточной температуры воздуха на станциях Черноморского региона выявил отсутствие данных в период 1940–1945 гг. Это проиллюстрировано на рис. 1. на примере январских аномалий температуры на станции Симферополь. Из рис. 1 видно, что в начале 1900-х годов также отсутствуют данные наблюдений, но это характерно только для ст. Симферополь.

В настоящей работе рассматриваются аномалии температуры, рассчитанные как отклонения от годового хода, и количество дней с температурой воздуха ниже 5-го процентиля. Далее величины температуры, соответствующие 5-му процентилю, обозначены как экстремально холодные температуры воздуха (ЭХТВ).

Проявления разных типов событий ЭН и ЛН в температурных экстремумах анализировались с помощью композитного анализа.

Расчет композитов выполнен следующим образом. Ежедневные аномалии среднесуточной температуры воздуха были усреднены за каждый месяц каждого года. Далее были отобраны величины аномалий и количества дней с ЭХТВ, соответствующие годам событий ЭН / ЛН, и усреднены между собой. Нами анализировались среднемесячные аномалии за каждый месяц в год события ЭН / ЛН (т.е. в «0» год) и на следующий год после его наступления (т.е. в «+1» год). Таким образом, получены композиты за 24 месяца.

Графическое отображение анализируемых лет с событиями ЭН и ЛН представлено на рис. 1. События, наблюдавшиеся в 1940–1945 гг., были исключены при расчете композитов. Как было отмечено выше, это обусловлено отсутствием данных наблюдений за температурой воздуха во всем Черноморском регионе в эти годы.

Среди современных классификаций ЭН и ЛН было выбрано 2 типизации, которые основаны на объективном пространственно-временном подходе. Это классификации Воскресенской и Марчуковой [9] для ЛН и Лубкова и соавт. [12] для ЭН. Отличие классификации ЭН Лубкова и соавт. [12] от Воскресенской и Михайловой [6] и других работ заключается в использовании более длительных данных, модернизированной методики кластеризации типов ЭН. В соответствии с результатами работы [12], события ЭН подразделяются на осенний центральный и весенне-летний восточный типы Эль-Ниньо.

Основным преимуществом классификации типов ЛН Воскресенской и Марчуковой [9] является применение пространственно-временных критериев для идентификации каждого события ЛН. В соответствие с ней, ЛН подразделяются на центральный и восточный типы.

Подробно рассматривать типизации как ЭН, так и ЛН здесь не будем.

Результаты и их анализ. Рассмотрим последовательно проявления событий ЭН, а затем и ЛН в характеристиках ЭТВ.

Проявления ЭН. За период 1900–2005 гг. отмечалось 15 весенне-летних восточных событий и 7 осенних центральных событий ЭН.

Различия между композитами аномалий температуры воздуха в Черноморском регионе наиболее заметны осенью «0» года – зимой-весной «+1» года (рис. 2а).

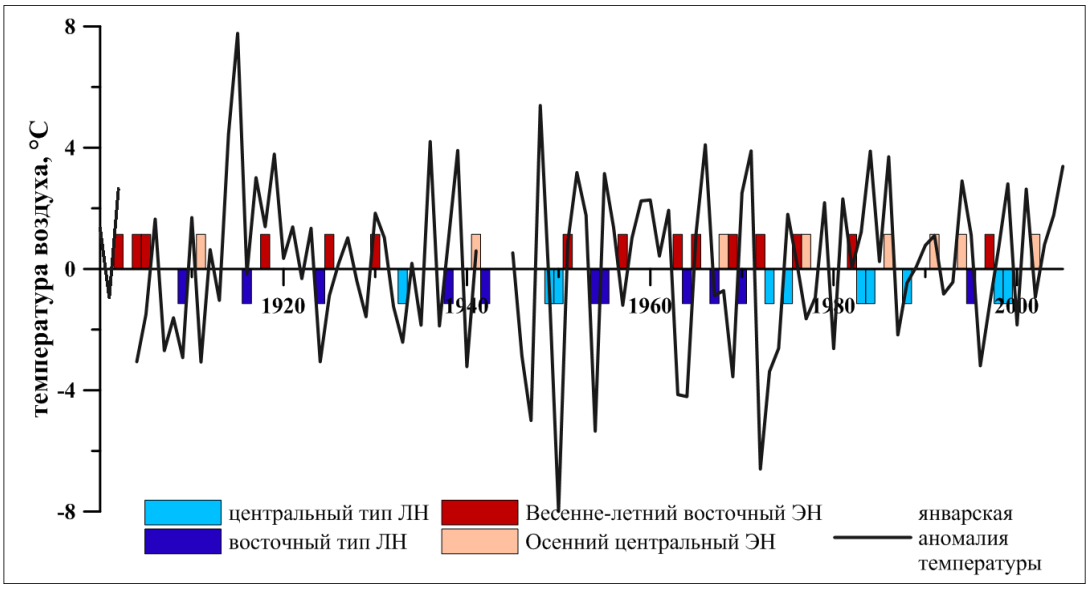


Рис. 1. Аномалии температуры воздуха на ст. Симферополь в январе за период 1900–2005 гг. Столбцами обозначены годы разных типов событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья

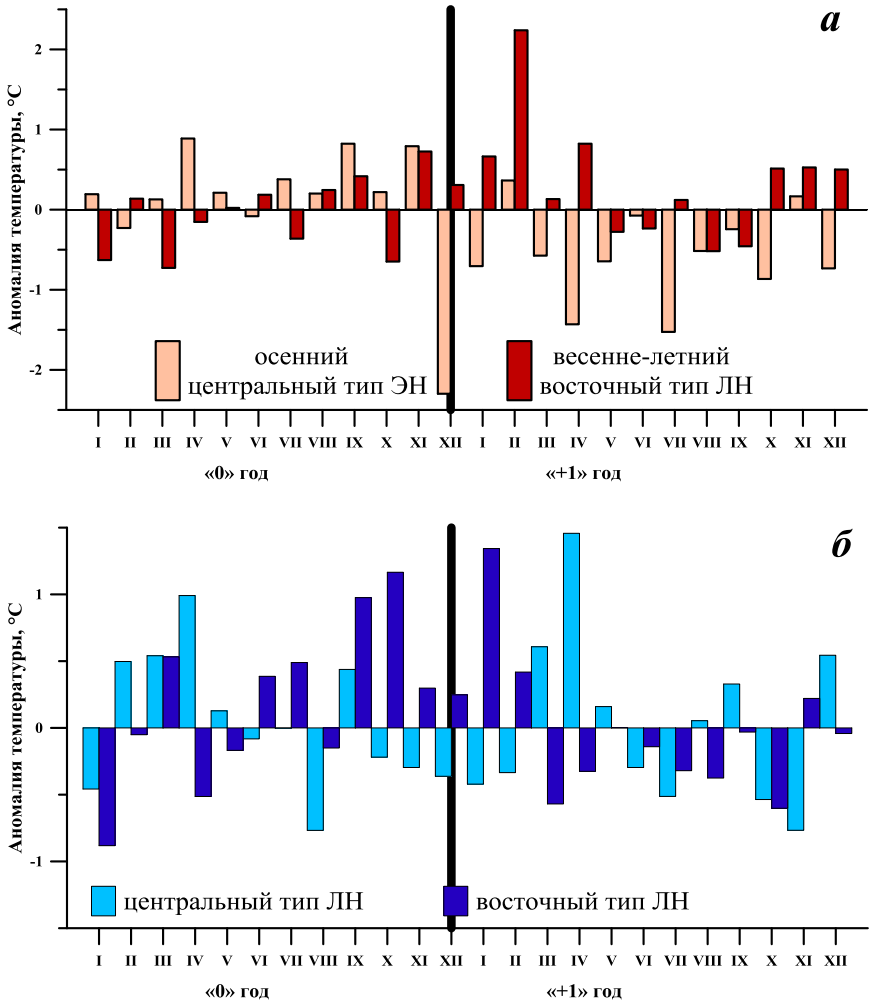


Рис. 2. Среднемесячные аномалии температуры воздуха на ст. Симферополь в годы осеннего центрального и весенне-летнего восточного типов Эль-Ниньо (а) и в годы центрального и восточного типов Ла-Нинья (б) в «0» год (т.е. в год события) и в «+1» год (т.е. на следующий год после наступления события)

Весенне-летний восточный тип ЭН в «0» год сопровождается преимущественно положительными аномалиями в Черноморском регионе на протяжении всего года: максимальная аномалия отмечается в ноябре (0,7°С). Исключение составляют отрицательные аномалии в январе, марте-апреле, августе и октябре. Однако их величины невелики. На протяжении зимнего и осеннего периода «+1» года, аномалии температуры при этом типе ЭН сохраняются положительными: максимум отмечается в феврале и составляет 2,2°С. Однако в теплый период «+1» года исследуемая характеристика отрицательна, составляя от -0,2 до-0,5°С, соответственно.

Осенний центральный тип ЭН в «0» год характеризуется положительными аномалиями температуры в Черноморском регионе во все месяцы, кроме февраля, апреля и декабря. Положительные величины находятся в пределах от 0,1 до 0,9°С. При этом отрицательная декабрьская аномалия составляет -2,3°С. Исследуемые аномалии при анализируемом типе ЭН в течение «+1» года преимущественно отрицательны: максимум отмечается в августе и составляет -1,5°С. При этом положительные аномалии, наблюдающиеся в феврале и ноябре, не превышают 0,4°С.

Весенне-летний восточный тип ЭН, относительно осеннего центрального, сопровождается противоположными по знаку аномалиями в большинстве месяцев как «0» года, так и «+1» года.

Основываясь на анализе композитов аномалий температуры, период с осени «0» года по весну «+1» года был выбран для анализа количества дней с экстремумами в годы ЭН разных типов. Этот период также характеризуется кульминацией событий ЭН / ЛН. Наиболее интересными для этого периода являются экстремально холодные температуры (ЭХТВ).

Максимальные величины композитов числа дней с ЭХТВ в годы ЭН обоих типов и наибольшие различия между ними отмечаются весной «+1» года, что видно из рис. 3а. При этом величины при осенне-центральном типе ЭН увеличиваются до 67% по сравнению с другим типом. Необходимо отметить, что осенью «0» года, в отличие от зимы-весны «+1» года, число дней с ЭХТВ при осенне-центральном типе ЭН уменьшается, однако величины разности между композитами не превышает 30%.

Проявления ЛН. Композиты аномалий температуры воздуха для всего Черноморского региона в годы ЛН разных типов представлены на рис. 2б. Центральный тип ЛН в период с февраля по июль, а также и в сентябре в «0» год сопровождается положительными аномалиями (от 0,1 до 1°С), а в январе и августе, а также с октября по декабрь – отрицательными (от -0,1 до -0,5°С). В «+1» год анализируемый тип ЛН характеризуется положительными аномалиями температуры в марте – мае, а также в сентябре и декабре. Они колеблются от 0,3 до 1,3°С. Отрицательные аномалии, наблюдающиеся в январе-феврале, июне-августе, октябре-ноябре «+1» года, невелики.

Восточный тип ЛН характеризуется преимущественно положительными аномалиями температуры в Черноморском регионе на протяжении всего «0» года, которые находятся в пределах от 0 до +1°С. Исключением являются аномалии в январе – феврале и апреле. Они отрицательны и колеблются от -0,2 до -0,7°С. В то же время с марта по октябрь «+1» года аномалии отрицательны (от -0,1 до -0,4°С), в остальные же месяцы – положительны (от 0,1 до 1,1°С).

Обратим внимание, что центральный и восточный типы ЛН в феврале, апреле, августе, а также с октября «0» года по май «+1» года и в сентябре, ноябре «+1» года сопровождаются противоположными по знаку аномалиями температуры воздуха.

Анализ числа дней с аномальной температурой в годы ЛН разных типов выполнен по единой методике, применённой и к композитам в годы ЭН.

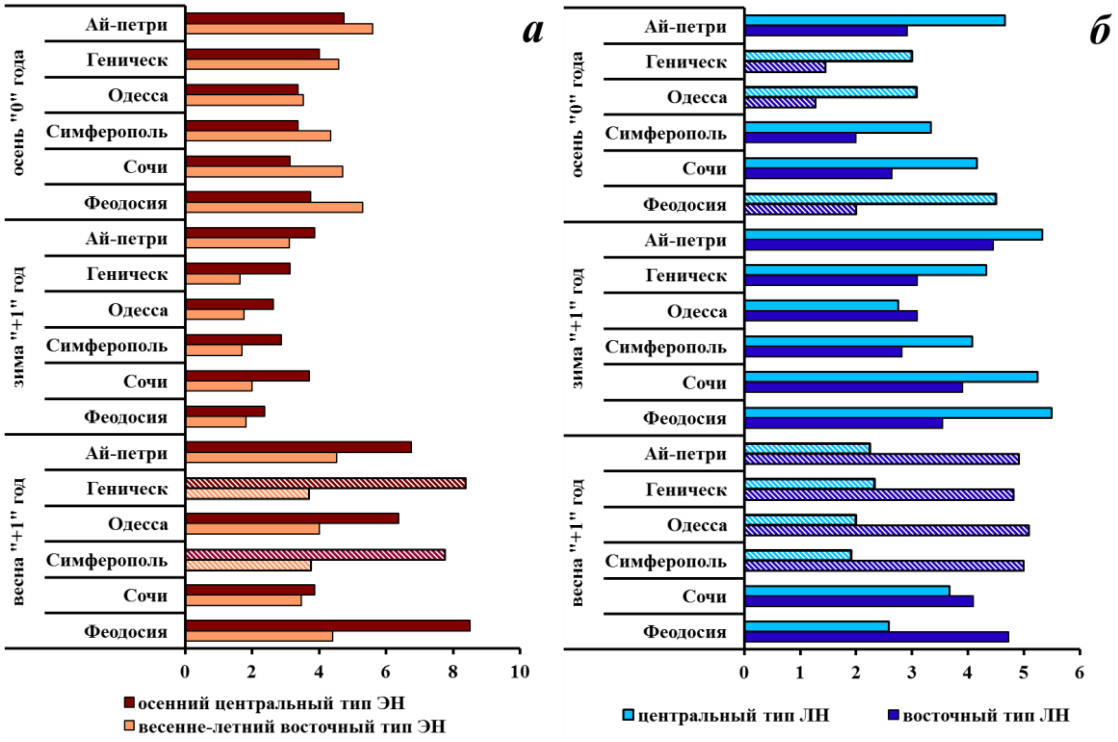


Рис. 3. Количество дней с экстремально холодной температурой на станциях Черноморского региона в годы Эль-Ниньо осенне-центрального (а) и весенне-летнего восточного (б) типов в период с осени «0» года по весну «+1» года. Заштрихованными столбцами обозначены композиты, разность которых превышает 50%

Число дней с ЭХТВ преимущественно во всем Черноморском регионе при центральном типе ЛН осенью «0» года – зимой «+1» года больше, чем при восточном типе. Максимальная разность между композитами в этот период отмечается осенью «0» года на ст. Одесса и составляет 59% (рис. 3б).

При этом весной «+1» года наблюдается противоположная ситуация, когда число дней с холодными экстремумами при таком же типе ЛН значительно меньше, чем при другом типе. При этом, максимальная разность между композитами достигает 62% (ст. Симферополь).

Выводы. Анализ изменений характеристик экстремальных температур воздуха в Черноморском регионе в связи с разными типами событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья в 1900–2005 гг., выполненный в настоящей работе, показал следующее.

Разные типы событий Эль-Ниньо / Ла-Нинья проявляются противоположными по знаку аномалиями температуры воздуха в Черноморском регионе в течение всего года, при этом они наиболее выражены для периода кульминации событий.

В годы осенне-центрального типа максимальное развитие Эль-Ниньо сопровождается увеличение до 2 раз повторяемости дней с экстремально холодной температурой воздуха в Черноморском регионе.

При центральном типе Ла-Нинья весной «+1» года количество дней с экстремально холодными температурами уменьшается до ~2-3 раз, по сравнению со вторым типом.

Таким образом, выявлены особенности проявлений разных типов событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья в аномалиях температуры и повторяемости холодных экстремумов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 16-05-00231 и 16-35-00186.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brönnimann S.* An extreme anomaly in stratospheric ozone over Europe in 1940–1942 / S. Brönnimann, J. Luterbache, J. Staehelin [et al.] // Geophysical Research. 2004. Letters 31. doi: 10.1029/2004GL019611.

2. *El Niño* and La Niña [Электронный ресурс]. Available: https://www.climate.gov/enso (дата обращения: 03.07.2017).

3. *О связи* климатических аномалий на территории России с явлением Эль-Ниньо – Южное колебание / Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова, Л.К. Клещенко [и др.] // Метеорология и гидрология. 1999. № 5. С. 32–51.

4. *Мохов И.И., Тимажев А.В.* Климатические аномалии в регионах Евразии: эффекты явлений Эль-Ниньо/Ла-Нинья // Доклады академии наук. 2013. Т. 453. № 2. С. 211–214.

5. *Воскресенская Е.Н., Михайлова Н.В.* Особенности изменчивости гидрометеохарактеристик Черноморского региона под влиянием разных типов Эль-Ниньо // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: МГИ, 2005. С. 262–267.

6. *Воскресенская Е.Н., Михайлова Н.В.* Классификация событий Эль-Ниньо и погодно-климатические аномалии в Черноморском регионе // Доповіді національної академії наук України. 2010. № 3. С. 124–130.

7. *El Nino* Modoki and its possible teleconnection / K. Ashok, S.K. Behera, S.A. Rao [et al.] // Geophysical research letters. 2007. 112. C11007.

8. *Weng H., Behera S.K., Yamagata T.* Anomalous winter climate conditions in the Pacific Rim during recent El Nino Modoki and El Nino events // Climate Dynamics. 2009. Vol. 32. P. 663–674.

9. *Воскресенская Е.Н., Марчукова О.В.* Пространственная классификация Ла-Нинья // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 1. С. 125–134.
doi: 10.7868/S0002351517010138.

10. *Железнова И.В., Гущина Д.Ю.* Отклик глобальной циркуляции атмосферы на два типа Эль-Ниньо // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 36–50.

11. *European* Climate Assessment & Dataset project [Электронный ресурс]. Available: http://eca.knmi.nl/ (дата обращения: 03.07.2017).

12. *Лубков А.С., Воскресенская Е.Н., Марчукова О.В.* Объективная классификация явлений Эль-Ниньо // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2017. № 1(149). С. 41–44.

EXTREME TEMPERATURE ANOMALIES IN THE BLACK SEA REGION ASSOCIATED WITH DIFFERENT EL NINO AND LA NINA TYPES

O.Yu. Kovalenko, E.N. Voskresenskaya

Institute of Natural and Technical Systems, Russian Federation, Sevastopol, Lenin St., 28

Features of manifestation of different El Niño and La Niña types on the temperature anomalies and number of extreme cold days in the Black sea region are investigated in the paper. Composite analysis have done and it is found differences between types events for temperature characteristics during year of the onset El Niño / La Niña event and the next year after its decay.

Keywords: temperature anomaly, number of days with extreme cold temperature, percentile, El Niño, La Niña, the Black Sea region.

УДК 551.583

ИЗМЕНЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА ТЕРРИТОРИИ ЮГА РОССИИ В КОНЦЕ XX – НАЧАЛЕ XXI ВВ.

Е.В. Вышкваркова

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: aveiro_7@mail.ru

С использованием данных об атмосферных осадках с метеорологических станций, расположенных на территории юга России, исследовано изменение режима этого параметра за период 1991 – 2010 гг. относительно 1970 – 1990 гг. Показано повсеместное увеличение осадков на территории юга России.
Ключевые слова: атмосферные осадки, аномалии, юг России

Введение. Основной особенностью современных изменений глобального климата является глобальное потепление конца XX в. – начала XXI в. (начиная со второй половины 1970-х годов), а основным индикатором – глобальная, т.е. осредненная по всему Земному шару, приповерхностная температура. Во временном ряде среднегодовых аномалий температуры приземного воздуха, осредненных по территории России, как и в глобальных временных рядах, период после 1976 г. характеризуется наиболее интенсивным потеплением. Средняя скорость потепления по территории Российской Федерации за период 1976 – 2012 гг. составляет 0,43°С/10 лет [1].

Согласно данным Института экологии и глобального климата, использованных во втором оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации [1], тренд годовых сумм осадков за период 1976 – 2012 гг. на большей части территории России положителен. В среднем по России он составляет 0,8 мм/месяц. Уменьшение осадков заметно на Европейской части России летом.

Температура воздуха является одной из важнейших характеристик климатической системы, и ее изменения в свою очередь влияют на другие процессы, в том числе осадкообразование. Повышение температуры приводит к увеличению количества водяного пара. Фундаментальная теория, климатические модели и эмпирические доказательства подтверждают, что потепление климата вследствие повышения содержания водяного пара приводит к более интенсивным осадкам, даже в том случае, если годовое количество осадков слегка уменьшается, с перспективой еще более сильных осадков, когда общее количество осадков увеличивается [2].

Поэтому цель работы – проанализировать аномалии атмосферных осадков на территории юга России за период 1970 – 2010 гг. на фоне положительного тренда температуры воздуха.

Регион исследования. Расположенный на границе умеренных и субтропических широт, на стыке равнин и гор, исследуемый регион отличается разнообразием климатических условий [3]. Гребень Большого Кавказа образует барьер между климатическими зонами умеренных средних широт и субтропиками, препятствуя движению холодных воздушных масс с севера в Закавказье и, наоборот, теплых воздушных масс в Предкавказье с юга. Предкавказье имеет полузасушливый климат на западе и более сухой климат на востоке. Кавказ находится не только на стыке умеренного и субтропического поясов, но и в пограничной зоне, расположенной в зоне влияния, с одной стороны, влажных воздушных масс с Атлантики и Средиземного моря, а с другой – сухих континентальных воздушных масс формирующихся над пространствами внутренних областей Евразии. Различия, вызванные описанным влиянием, становятся более выраженными из-за рельефа местности. Размеры Черного и Каспийского морей не являются достаточными для форми-

рования над ними воздушных масс морского типа. Большей части юга России свойственен умеренно-континентальный климат. В связи с этим климат характеризуется теплым продолжительным летом – средняя температура июля +20°С – +24°С, средняя температура января изменяется от –2°С до –5°С градусов. Среднее годовое количество осадков уменьшается от 400 – 600 мм на западе до 200 – 400 мм на востоке. Наибольшее количество осадков за месяц выпадает в июне – июле (50 – 70 мм) в западной части региона. Снежный покров в регионе появляется в конце ноября – начале декабря, а устойчивый снежный покров образуется в конце декабря – начале января. В восточной части региона две трети осадков выпадает в теплое время года (с апреля по октябрь). Большое количество из них попадают в летнее время, когда испарение превышает количество осадков. Большая часть осадков (около 80%), выпадает в виде дождя, еще 15% в виде дождя и снега, и лишь около 5% в виде снега.

Субтропический тип климата распространен на Черноморском побережье Кавказа. Отроги Кавказских гор защищают побережье от проникновения холодных воздушных масс с Восточно-Европейской равнины в зимний период, так что средняя температура января в этом районе - положительная. Лето теплое и долгое. Средняя температура в июле +22 – +26°С. Климат побережья не только теплый, но и влажный. В среднем выпадает около 800 мм осадков, с их относительно равномерным распределением в течение всего года. Количество влаги увеличивается от берегов до предгорий. К северу от Туапсе годовое количество осадков составляет 1200 мм, но быстро уменьшается до 800 – 900 мм в районе Геленджика и до 400 мм в районе Анапы – Новороссийск. В западной части, на морских склонах (до 600 м) количество осадков достигает 2000 – 2400 мм. Повышенная циклоническая деятельность приводит к зимнему максимуму осадков на Черноморском побережье Кавказа в холодное время года.

Территория Крымского полуострова весьма мала, но ее климат характеризуется широким разнообразием типов. Есть степи, горы и климат южного берега Крыма. Каждый тип климатической зоны характеризуется своими особенностями: характером выпадения осадков, температурным режимом и др. Климат степной зоны умеренно-континентальный с максимальной суммой осадков в летний период, годовое количество осадков составляет около 350 мм. Южный берег Крыма характеризуется субсредиземноморским климатом с максимальным количеством атмосферных осадков в зимний период и годовым количеством осадков около 650 мм [4, 5].

Данные и методика. В работе использованы месячные суммы осадков (с 42 станций) по территории юга России за период 1970 – 2010 гг. Данные о станциях приведены в табл. 1. Данные взяты с сайта Climate Explorer [5]. Все данные подверглись строгому контролю качества (графическому и статистическому). Сначала рассчитывалась разность между сезонными и годовыми значениями осадков за два периода 1970 – 1990 гг. и 1991 – 2010 гг. в абсолютных величинах (в мм). Для полученных разностей проводилась оценка статистической значимости разности между средними по двум периодам (по критерию Стьюдента с использованием уровня значимости p = 5%).

Далее рассматривались нормированные аномалии количества осадков (относительно климатических норм). Аномалии рассчитывались по формуле

$$A = (R - Rn)/Rn, \qquad (1)$$

где R – фактическое значение осадков (в данном случае осадки за период 1991 – 2010 гг.), а Rn – климатическая норма (количество осадков за период 1970 – 1990 гг.). Аномалии рассчитаны для среднегодовых значений и выражены в процентах.

Результаты. Сравнение среднегодового количества осадков для двух периодов (1970 – 1990 и 1991 – 2010 гг.) для станций территории юга России показало, что на большей части изучаемого региона отмечено увеличение среднегодовых сумм осадков за период 1991 – 2010 гг. относительно первого периода (табл. 1).

Таблица 1. Географические координаты, высота над уровнем моря, среднегодовое количество осадков за период 1970 – 2010 гг. и разность между среднегодовым количеством осадков за период 1970 – 1990 и 1991 – 2010 гг. для станций, расположенных на территории юга России

Станция	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Высота н.у.м., м	P (мм)	Разность (мм)
Анапа	44,90	37,30	30,0	513	-15,1
Армавир	44,98	41,12	159,0	629	55,8
Астрахань	46,28	48,05	-23,0	222	37,1
Ахты	41,47	47,73	1047,0	393	30,8
Буденновск	44,80	44,10	136,0	418	42,4
Буйнакск	42,82	47,12	472,0	463	16,5
Верхний Баскунчак	48,20	46,70	35,0	279	25,4
Волжский	48,67	44,45	28,0	407	-3,8
Гигант	46,52	41,35	79,0	532	18,9
Гудермес	43,40	46,10	75,0	459	14,8
Дербент	42,07	48,30	-19,0	387	22,0
Джанкой	45,70	34,40	8,0	385	-13,4
Евпатория	45,19	33,38	6,0	387	-11,0
Зеленчукская	43,87	41,57	928,0	732	4,7
Каспийск	45,40	47,40	-24,0	223	53,7
Керчь	45,36	36,39	49,0	446	34,1
Кисловодск	43,90	42,72	890,0	657	8,3
Красная поляна	43,60	40,20	566,0	1993	29,7
Краснодар	45,03	39,15	29,0	705	91,1
Махачкала	42,97	47,55	28,0	356	64,8
Минеральные воды	44,20	43,10	316,0	500	15,9
Нижнегорск	45,45	34,71	20,0	417	80,6
Приморско-Ахтарск	46,03	38,15	3,0	597	-7,8
Ремонтное	46,60	43,70	106,0	419	12,3
Ростов-на-Дону	47,25	39,82	66,0	617	7,8
Севастополь	44,62	33,53	7,0	442	2,1
Симферополь	44,95	34,12	181,0	513	-4,5
Сочи	43,58	39,77	57,0	1658	98,8
Ставрополь	45,05	42,02	473,0	555	4,7
Сулак	42,40	46,25	29,0	979	-22,9
Таганрог	47,20	38,95	30,0	571	56,7
Туапсе	44,10	39,10	41,0	1391	121,8
Урюпинск	50,80	42,00	110,0	444	-15,8
Феодосия	45,03	35,38	22,0	477	38,7
Фрлово	49,80	43,70	119,0	450	-6,0
Цимлянск	47,63	42,12	64,0	472	-4,8
Черноморское	45,52	32,72	10,0	377	-12,7
Чертково	49,40	40,20	145,0	540	47,6
Шаджатмаз	43,73	42,67	2070.0	642	-66,3
Элиста	46,32	44,30	151,0	363	53,7
Южно-Сухокумск	44,35	45,83	19,0	294	20,4
Ялта	44,48	34,16	72,0	573	-20,8

Уменьшение среднегодового количества осадков характерно для северо-западной части Крымского полуострова (до 20 мм). Для севера исследуемого региона (территория Волгоградской области, до 16 мм), и для некоторых единичных станций расположенных на побережье Азовского и Черного морей, а также в высокогорной части Кавказа (максимальное уменьшение до 66 мм).

Максимальное увеличение осадков типично для Черноморского побережья Кавказа (до 122 мм в Туапсе). Большое и статистически значимое (на пятипроцентном уровне значимости) увеличение осадков наблюдается на побережье Каспийского моря, а также для станций Краснодар и Нижнегорск (Крым).

Рассмотрим изменение сезонных сумм осадков по территории юга России. Зимой также преобладает положительная разность, то есть увеличение количества осадков во второй период. Уменьшение осадков наблюдается в юго-западной части Крымского полуострова (до 18 мм), на Черноморском побережье Кавказа (до 18 мм) и на нескольких станциях. Весной наблюдается похожая картина. Уменьшение количества осадков в период 1991 – 2010 гг. относительно периода 1970 – 1990 гг. характерно для Крымского полуострова (кроме восточной части), для высокогорных станций Кавказа (уменьшение до 26 мм), а также для станций Гудермес и Сулак (уменьшение до 20 мм). Для остальной территории характерно увеличение весенних сумм осадков во второй период (1991 – 2010 гг.). Статистически значимое увеличение осадков наблюдается для станций Туапсе и Элиста. Летний сезон характеризуется противоположной картиной – на большей части территории отмечается уменьшение количества осадков. Увеличение характерно для восточной и центральной части исследуемого региона. Осенний сезон характеризуется увеличением количества осадков в период 1991 – 2010 гг. по всему региону, в том числе и на территории Крымского полуострова.

Теперь рассмотрим распределение аномалий осадков. Аномалии лучше характеризуют изменения режима осадков, чем разность в абсолютных величинах. На рис. 1 представлена карта распределения среднегодовых аномалий осадков по территории юга России за период 1991 – 2010 гг. относительно периода 1970 – 1990 гг. (% от *Rn).*

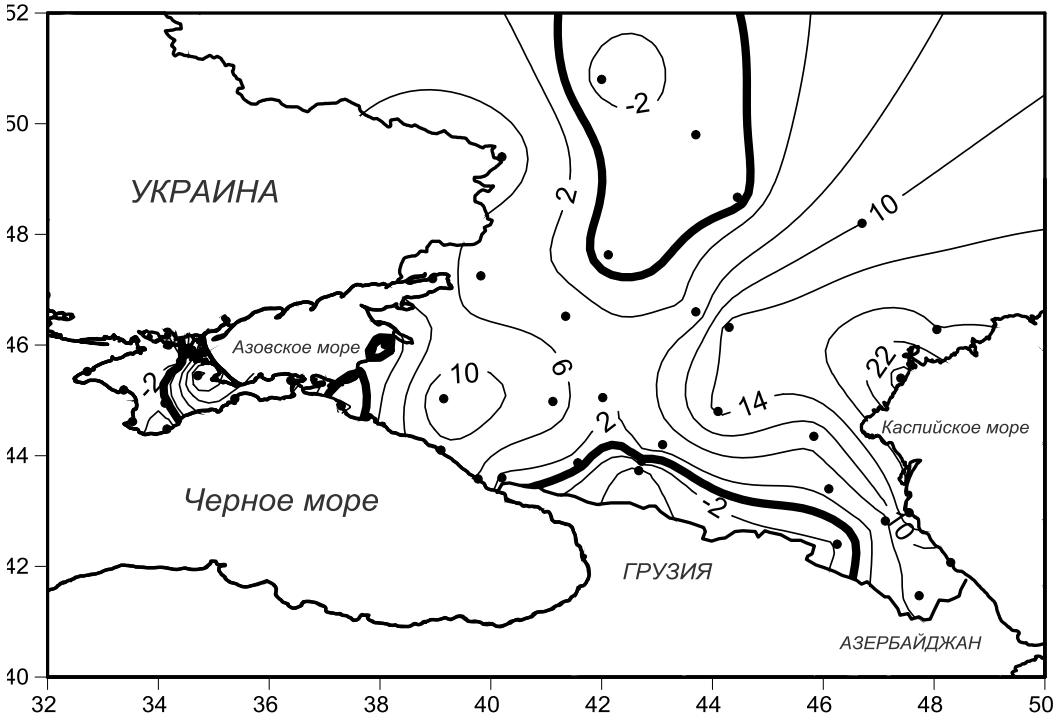


Рис. 1 Пространственное распределение аномалий осадков (%) за период 1991 – 2010 гг. относительно периода 1970 – 1990 гг. по территории юга России. Черными точками указано расположение метеостанций. Жирным выделена изолиния с нулевой аномалией

Для большей территории региона характерны положительные аномалии осадков. По территории Краснодарского края аномалия изменяется в переделах 6 – 11%. Севернее (Ростовская область) величина аномалии снижается до 2–4%. Максимальные аномалии приурочены к побережью Каспийского моря и Прикаспийской низменности (до 22%). Положительная аномалия характерна также и для восточной части Крымского полуострова, с максимумом на северо-востоке (Нижнегорск).

Отрицательные аномалии осадков типичны для западной части Крымского полуострова (в среднем величина аномалии составляет 3 – 4%), северной части изучаемого региона (Волгоградская область, до 2%), а также для высокогорных районов Кавказа. Здесь величина аномалии в среднем составляет 4%, а максимальная аномалия достигает 8% и характерна для станции Шаджатмаз.

Заключение. Полученные результаты регионального масштаба согласуются с результатами глобальных исследований. Во многих районах Земного шара наблюдается увеличение количества и интенсивности осадков. Эти изменения связаны с увеличением выбросов водяного пара в атмосферу вследствие потепления океанов, особенно в нижних широтах [2]. Расчеты показали увеличение среднегодовых и сезонных сумм осадков в период 1991 – 2010 гг. практически для всего региона, однако статистически значимое увеличение характерно для восточной части Предкавказья (побережье Каспийского моря и Прикаспийская низменность) для года в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Второй* оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории российской Федерации. Общее резюме, Москва, 2014 [Под ред. Фролова А.В.]. М.: Росгидромет, 2014. 60 с.
2. *IPCC*, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
3. *Федеральний* портал Protown.ru [Электронный ресурс]. Сайт URL: http://priotown.ru (дата обращения 30.06.2017).
4. *Клімат* України / За ред. Ліпінський В.М., Дячук В.А., Бабіченко В.М. К.: Видавництво Раєвського, 2003. 564 с.
5. *Климатический* атлас Крыма / Приложение к научно-практическому дискуссионно-аналитическому сборнику «Вопросы развития Крыма». Симферополь: Таврия-Плюс, 2000. 120 с.
6. *База* данных Метеорологического института Королевства Нидерланды KNMI Climate Explorer [Электронный ресурс]. Сайт URL: http://climexp.knmi.nl (дата обращения: 01.03.2017).

CHANGE OF THE PRECIPITATION IN THE TERRITORY OF SOUTHERN RUSSIA AT THE END OF THE XX – BEGINNING OF THE XXI CENTURY

E.V. Vyshkvarkova

Institute of Natural and Technical Systems, Russian Federation, Sevastopol, Lenin St., 28

Using precipitation data from meteorological stations over the territory of South of Russia, behavior of this parameter for period 1991 – 2010 relatively to 1970 – 1990 was investigated. Ubiquitous increase in precipitation over the South of Russia was shown.

Keywords: precipitation, anomalies, Southern Russia.

УДК 551.89 551.583.7

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ СЕТЕВЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА БАЛАНСА МАССЫ ЛЕДНИКОВ (НА ПРИМЕРЕ ЛЕДНИКА ДЖАНКУАТ, ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КАВКАЗ)

О.О. Рыбак[1,2], Е.А. Рыбак[2,1]

[1] Филиал Института природно-технических систем, г. Сочи, Курортный проспект, 99/18
E-mail: o.o.rybak@gmail.com
[2] Сочинский научно-исследовательский центр РАН, г. Сочи, ул. Театральная, 8а
E-mail: elena.rybak@gmail.com

Для расчета приходной и расходной частей баланса массы горного ледника необходима информация о ряде переменных. Приземную температуру воздуха в бассейне ледника относительно несложно связать линейными соотношениями с рядами наблюдений на сетевых метеостанциях. Гораздо сложнее оценить приход массы, который формируется не только за счет выпадающих атмосферных осадков, но и как результат перераспределения снега вследствие метелевого переноса и лавинного питания. В статье рассматриваются вопросы расчета удельного баланса массы ледника Джанкуат (Центральный Кавказ). Результаты математического моделирования соотносятся с данными снегомерных съемок и исследования шурфов. Показано, что при определенном соотношении ряда малоизвестных параметров, характеризующих зимнее снегонакопление, возможно воспроизвести кумулятивный баланс массы.
Ключевые слова: горный ледник, Кавказ, климат, аккумуляция, абляция, баланс массы, математическая модель.

Введение. Во многих регионах мира горные ледники играют роль регуляторов речного стока. Пресная вода, аккумулируемая ледниками в течение холодной половины года, высвобождается в период таяния, и, согласно оценке [1], ее доля в общем объеме речного стока в предгорных регионах, например, Северного Кавказа, где реки имеют преимущественно ледниковое питание, может достигать 70%. Разумеется, в условиях роста водопотребления, связанного с ростом населения и развитием экономики, прогностические оценки доступных водных ресурсов в будущем имеют первостепенное значение. Проблемы, связанные с сокращением горного оледенения в условиях меняющегося климата, остро стоят во многих регионах мира, к примеру, в Средней Азии, создавая напряжение между отдельными странами [2], которое при росте дефицита водных ресурсов может перерасти в полномасштабный межгосударственный конфликт.

Региональные изменения климата в будущем, которые далеко не всегда следуют глобальным тенденциям, оценивать достаточно сложно, а сами оценки, которые строятся на основании тех или иных сценариях изменений глобального климата, достаточно спорны. Тем не менее, в горных и предгорных регионах, где экономика и социальная инфраструктура критически зависят от доступности водных ресурсов, необходимо иметь научно обоснованную стратегию долгосрочного планирования водопотребления. Ее важнейшей составляющей объективно является прогноз ледникового стока. Его расчеты напрямую связаны с прогностическими расчетами баланса массы горных ледников и наличием наиболее вероятных изменений регионального климата.

Единой и общепринятой методики построения прогностических оценок ледникового стока не существует. Тем не менее, для перевода чисто академической задачи в прикладную плоскость, необходимо выделить стандартные этапы. Некоторые из этих этапов могут выполняться параллельно, другие – последовательно. По нашему мнению, основные шаги построения регионального прогноза ледникового стока, могут быть сведены к следующим.

1. Выбор прогностического климатического сценария (схематического или основанного на модельных расчетах).

2. Выбор типа математической модели горного ледника.

3. Выделение в регионе реперных (опорных) ледников, для которых имеется максимально доступный объем данных.

4. Определение способа экстраполяции результатов моделирования динамики реперных ледников на другие ледники выбранного региона исследований.

5. Калибровка модели – определение наиболее вероятных значений ключевых настраиваемых модельных параметров [3].

6. Если сценарий основан на прогностических модельных расчетах, необходимо выбрать способ даунскейлинга [4]. Изменения отдельных климатических переменных могут задаваться схематически [5].

7. Валидация модели – воспроизведение в численных экспериментах совокупности наблюденных величин (скорости течения, баланса массы и т.д.) по набору заданных климатических переменных (входных данных).

8. Проведение серии прогностических численных экспериментов и интерпретация их результатов.

Основным препятствием для объективных прогностических расчетов является недостаток наблюдений. Это связано, в первую очередь, с труднодоступностью ледников и трудоемкостью проведения исследований. Разумеется, растущий объем данных, получаемых с помощью дистанционных методов (спутниковых, с применением беспилотных летательных аппаратов), облегчает задачу. Дистанционные методы, однако, не могут в полной мере заменить наблюдения непосредственно на ледниках. Поскольку организация мониторинга на каждом, даже относительно крупном леднике, очевидно слишком затратна, их проводят на немногих типичных (опорных, реперных) ледниках. Таковым для Центрального Кавказа является ледник Джанкуат. Его расчетные площадь и объем по состоянию на 2012-2013 гг. составляют 2,45 км^2 и 0,077 км^3 соответственно [6]. Он является типичным для своего региона горно-долинным ледником. Его выбор в качестве опорного обусловлен сходством его морфометрических характеристик со среднестатистическим ледником Кавказа [6]. Регулярные наблюдения здесь ведутся в течение последнего полувека. Набор наблюдаемых данных делает Джанкуат фактически идеальным объектом для калибровки и валидации математической модели динамики горного ледника. Для анализа закономерностей формирования приходной и расходной частей баланса массы, на леднике выделяют 13 высотно-морфологических зон (рис. 1).

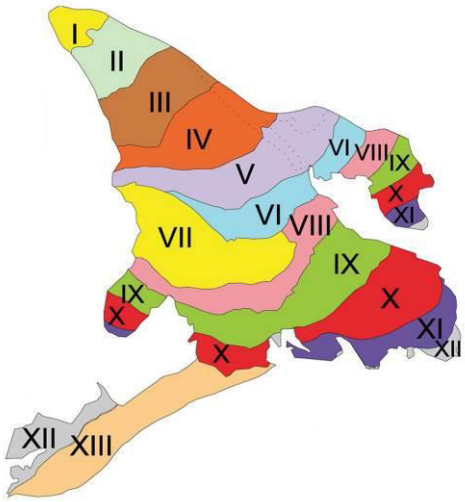


Рис. 1. Высотно-морфологические зоны ледника Джанкуат [7]

Мы использовали данные сетевых метеорологических станций (МС) Терскол и Местиа, расположенных в непосредственной близости от ледника, для сопоставления данных наблюдений за приземной температурой количества осадков и на них, и на автоматической метеорологической станции (АМС), работающей в теплую половину года непосредственно на леднике. Для расчета зимних осадков использовались данные снегомерных съемок в отдельные годы, которые сопоставлялись с измеренным количеством осадков на МС Местиа. Построенные линейные регрессионные модели связи метеовеличин на МС и АМС дали возможность реконструировать ряды приземной температуры воздуха и количества осадков на леднике в прошлом, и максимально объективно рассчитать поля приходных и расходных составляющих поверхностного баланса массы. Корректность расчетов была про-

верена путем сопоставления с полями баланса, построенными на основе данных многолетних наблюдений. Проделанное исследование является одним из этапов проведения даунскейлинга данных глобального климатического моделирования, методика которого в основных чертах изложена в [4].

Параметризация приземной температуры воздуха. Расчет поля приземной температуры воздуха непосредственно над ледником производится путем построения простой линейной зависимости между среднесуточной температурой воздуха на сетевой метеостанции Терскол и автоматической метеостанции, устанавливаемой на поверхности ледника в зоне абляции на абсолютной высоте около высоте около 3000 м н.у.м. (рис. 2).

Рис. 2. Автоматическая метеостанция (АМС) на леднике Джанкуат

Для сопоставления был выбран непрерывный ряд с минимальным количеством пропусков в летние месяцы 2007 г. (рис. 3). Было получено линейное соотношение

$$\overline{T}_A^{Djankuat} = a + b\overline{T}_A^{Terskol}, \qquad (1)$$

где a = -2,98±0,48; b = 0,82±0,03.

Выражение (1) неявным образом учитывает температурный скачок (систематическое понижение температуры воздуха), который обычно наблюдается при перемещении на ледник.

Ниже мы будем опускать верхний индекс *Djankuat* при обозначении температуры воздуха. В качестве исходной «прогностической» переменной используется именно среднесуточная температура воздуха, а не срочные значения, поскольку в будущих прогностических расчетах предполагается использовать именно среднесуточные значения. В модели же баланса массы расчеты ведутся с часовым разрешением, чтобы учесть суточный ход приходящей солнечной радиации. Соответственно, для расчета других, связанных с ним переменных (например, эффективного излучения) необходимы ежечасные значения температуры воздуха и температуры поверхности. Помимо этого, значения ежечасной температуры воздуха T_A определяют границу таяния при достаточной доступной энергии на поверхности ледника. Суточный ход (ежечасные значения) задается простой гармонической формулой:

$$T_A = \overline{T}_A - \tilde{T}_A \cos\left(2\pi \frac{t}{24}\right), \qquad (2)$$

где $\tilde{T}_A$ – суточная амплитуда; t = 0, …,23 – время в часах. $\tilde{T}_A$ определяется (параметризуется) в соответствии с метеонаблюдениями.

Уравнение (1) задает приземную температуру воздуха на абсолютной высоте АМС. На всю территорию ледника приземная температура экстраполируется с учетом приземного градиента, который также считается настраиваемым параметром, поскольку в условиях высокогорья может меняться в широких пределах [4].

Параметризация аккумуляции. Параметризация аккумуляции по данным метеонаблюдений несколько сложнее, чем параметризация температуры воздуха. В первую очередь, необходимо четко определить, что понимается под

аккумуляцией в контексте ее формализации в математической модели. Итак, под аккумуляцией мы будем понимать общее количество вещества в приходной части поверхностного баланса массы. Сюда относятся осадки (жидкие, твердые, смешанные), из суммы которых вычитается количество испарившегося снега или талой воды. Полезной величиной, которую достаточно просто определить из наблюдений (снегомерных съемок, комплекса измерений в шурфах), является зимний баланс массы, который формально можно записать как [7]

$$b_w = X_m \pm P \pm M \pm V, \qquad (3)$$

где первый член в правой части обозначает сумму твердых осадков, второй – нарастающие осадки, третий – метелевый перенос, четвертый – лавинное питание. Основной источник в приходной части баланса – атмосферные осадки. В непосредственной близости от ледника Джанкуат расположены две сетевые метеостанции – Терскол в долине р. Баксан и Местиа на территории Грузии на южном макросклоне Главного Кавказского хребта. Среднегодовое количество осадков на обеих станциях приблизительно одинаковое – около 1000 мм/год. Парадоксально, но в долине р. Адыл-Суу, в верховьях которой расположен ледник Джанкуат, среднегодовое количество осадков гораздо больше (рис. 4). Согласно данным снегомерных съемок (В.В. Поповнин, частное сообщение), аккумуляция твердого вещества на леднике в течение 1999/2000 – 2008/2009 балансовых годов составило 2577 мм. В эту сумму в соответствии с (3) помимо твердых осадков входят нарастающие осадки, метелевый перенос снега с окружающих склонов и лавинное питание. Следует отметить, что последние два компонента зимнего баланса едва ли возможно сколько-нибудь точно количественно определить для ледников в целом. Они чрезвычайно сильно зависят от местных климатических условий, рельефа местности и т.д. Так, по оценке П.М. Лурье и др. [8] доля метелевого переноса для ледников Кавказа варьируется в пределах 10–42%, снежных лавин – 3–76%. Физические модели, описывающие метелевый перенос и перераспределение снега после его выпадения, разрабатываются достаточно давно, но, главным образом, для условий ровной или слабовсхолмленной поверхности (см. обзор, например, в [9]).

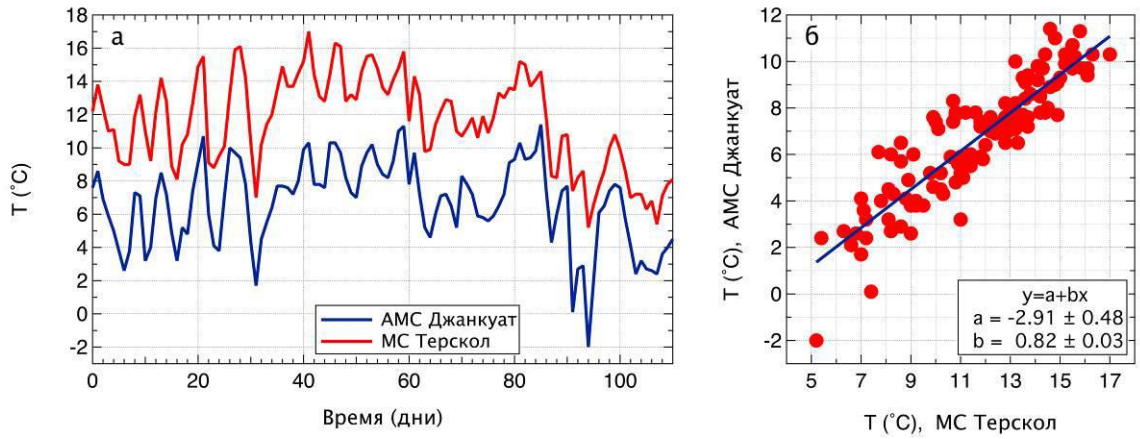


Рис. 3. Среднесуточная приземная температура воздуха (°С), измеренная одновременно на сетевой метеостанции (МС) Терскол и автоматической метеостанции (АМС) Джанкуат летом 2007 г. (а). Линейная связь между ними (б)

Их практическое применение существенно затрудняется сложным рельефом в бассейне горных ледников, наличием крутых склонов, перепадом высот, и требует полной информации о поле ветра в бассейне ледника (которое в свою очередь возможно, например, рассчитывать на мезомасштабных моделях) и о поле аккумуляции (восстановленном тем или иным способом). В [9] подчер-

кивается, что ключевую роль при расчете (зимнего) баланса массы играет именно аккуратный расчет поля ветра. Очевидно, что в прогностических расчетах на достаточно отдаленную перспективу, на что, в конечном итоге и направлена наша работа, получить такие поля, разумеется, возможно путем стыковки глобальных моделей климата и мезомасштабных моделей (региональных климатических моделей), однако едва ли подобные прогностические расчеты будут иметь какую-либо ценность.

Примерно так же, как с формализацией оценки вклада метелевого переноса обстоят дела и с оценкой вклада лавинного питания. Количественная оценка роли лавинного питания в приходной части поверхностного баланса массы горного ледника представляет собой достаточно сложную задачу. С одной стороны, доля лавинного питания в приходной части баланса массы каждого отдельно взятого ледника очень индивидуальна. Она определяется геоморфологическими и климатическими особенностями. С другой стороны, вклад лавинного питания может варьироваться в широких пределах от года к году. Лавинное питание в [7] определяется как масса снега, дополнительно перенесенная гравитационными процессами на поверхность ледника из-за его пределов после начальной седиментации твердых атмосферных осадков. К категории лавинного питания помимо собственно лавин можно отнести и иные процессы, обусловленные влиянием силы тяжести, например, т.н. снежные ручейки из свежевыпавшего сухого снега или вязкопластическое перемещение снежной массы с окружающих скал. Перемещение снежной массы лавинами на самом леднике не может рассматриваться в качестве лавинного питания, поскольку речь в данном случае идет о внутрибассейновом перераспределении. Для условий Джанкуата проводились количественные оценки вклада лавинного питания [7]. Для этого из всего ряда доступного набора многолетних данных был выбран типичный (т.е. с более-менее репрезентативными условиями снегонакопления) балансовый год (1998/1999). В этом году лавинное питание составило 458 мм водн. экв. при общей величине аккумуляции 2431 мм водн. экв. или 19%.

Итак, если принять среднее из оценки [8] вклада метелевого переноса (26%) и лавинного питания (19%) из [7], то суммарный вклад этих двух факторов составит 45%, причем только зимней аккумуляции, т.е. приблизительно 1260 мм водн. экв. в среднем за период 1999/2000 – 2008/2009 балансовых годов. В то же время зимние (твердые) осадки на метеостанциях Местиа и Терскол составили около полвины годового количества, т.е. 500–600 мм/год. Таким образом, поступлением снега из обоих упомянутых источников (метелевый перенос и лавинное питание; нарастающими осадками можно пренебречь ввиду их незначительности по сравнению с остальными источниками) нельзя объяснить того факта, что снегонакопление превышает количество ежегодно выпадающих твердых осадков в 3-4 раза. Приблизительный подсчет показывает, что зимние осадки в бассейне ледника должны вдвое превышать измеренные на сетевых метеостанциях. Особенности атмосферной циркуляции являются причиной повышенного количества осадков независимо от состава последних. Действительно, согласно оценке [10], основанной на анализе, главным образом, показаний осадкомеров (осадки только летнего периода) и снежных шурфов (только зимние осадки), проведенного в 1973/74 гг., суммы осадков на леднике Джанкуат в 1,7 раза превышали месячные суммы осадков на метеостанции Терскол. Для ледника Джанкуат, как и для иных ледников, характерно увеличение количества осадков с высотой. При этом высотный градиент подвержен значительным как внутригодичным, так и междугодичным изменениям. Заметим, что данные по высотному распределению осадков носят отрывочный характер и относятся, главным образом, к летнему периоду. Так в июле 1971 г. градиент составил 7,2 мм/100 м, а годом ранее – 2,4 мм/100 м. Для августа аналогичные соотношения составили 8,8 и 1,6 мм/100 м [10]. В сезон аккумуляции, по-

видимому, высотные градиенты существенно выше. В 1973/74 гг. влагозапас в самой нижней высотно-морфологической зоне (рис. 1) составил 1255 мм, а в самой верхней – 3075 мм, то есть в 2,45 раза больше. Высотный градиент составил 200 мм/100 м. По всей вероятности, более высокие значения градиента отчасти можно объяснить вкладом лавин и поступлением снега с окружающих склонов. Высотный градиент осадков в зимний сезон 1973/74 гг. не может считаться экстремальным. Так, в среднем за 8 сезонов аккумуляции (1968–1975 гг.) отношение количества осадков на высоте 3200 м н.у.м. было в 1,5 раза больше, чем у его языка. С учетом того, что верхние высотно-морфологические зоны (XI–XIII) расположены в диапазоне приблизительно 3500–3700 м н.у.м., экстраполируя с тем же высотным градиентом, получим аналогичную оценку (около 2-2,3 раза). Тем не менее, в условиях очевидного недостатка исходной информации высотный градиент осадков неизбежно становится настраиваемым модельным параметром. При этом целесообразно различать градиенты для зимнего и летнего периода.

Расчет осадков определенного типа (твердые, жидкие, смешанные) в модели связан с параметризацией температуры воздуха, т.к. именно ее среднесуточное значение определяет соотношение твердых и жидких осадков [11].

Таким образом, параметризация аккумуляции возможна только в связке с параметризацией среднесуточной температуры воздуха. В связи с тем, что аналитически определить значения набора параметров для максимально точного определения значения аккумуляции практически невозможно, целесообразно провести серию численных экспериментов, в которых путем варьирования нескольких ключевых параметров можно получить удовлетворительное приближение искомой величины. В нашем случае для этих целей были использованы ряды среднесуточной температуры воздуха, измеренной на метеостанции Терскол в период балансовых годов 1999/2000 – 2008/2009 и приведенных к условиям АМС Джанкуат в соответствии с методикой, описанной в предыдущем разделе, а также ряды суточных сумм осадков за этот же период на метеостанции Местиа. Целевым значением, которое было необходимо максимально точно воспроизвести в численных экспериментах, была средняя за этот же период величина водозапаса снежного покрова (зимний баланс массы) в среднем для ледника Джанкуат, полученная в результате снегосъемок в этот же период (упомянутое выше значение 2577 мм). Следует отметить, что в указанную величину зимней аккумуляции мы включаем все твердые осадки, выпадающие в течение периода с 1 сентября по 31 мая. Крайние месяцы периода (сентябрь и апрель) являются по сути дела переходными. На сентябрь приходится окончание сезона абляции и начало периода аккумуляции, поэтому твердые осадки, выпадающие в течение этого месяца целесообразно учитывать при расчете значения зимней аккумуляции [10]. Апрель и май, также, казалось бы, выходящие за пределы условно холодного периода, мы включаем по той причине, что снегосъемка, как правило, приходится на период конца мая и июнь, и, таким образом, учитывает твердые осадки, выпавшие в это время. Еще одна немаловажная величина, которая учитывается нами при расчете зимней аккумуляции – количество повторно замерзшей талой воды или жидких осадков, выпавших при среднесуточной температуре в пределах от 0 до -2^{o}C («внутреннее питание» [7]), которое рассчитывается по упрощенной схеме [11]. В связи с тем, что в дневные часы абляция в сентябре, апреле и мае может наблюдаться в областях с устойчивым снежным покровом, то талая вода или жидкие осадки, повторно замерзшие в толще снега, учитываются при проведении денсометрического анализа во время выполнения снегосъемок. По данным косвенных оценок [10] величина внутреннего питания достаточно постоянна во времени и составляет в среднем по леднику 150±30 мм водн. экв. При расчетах удельного баланса В.В. Поповнин (частное сообщение) использует значение 210 мм водн. экв.

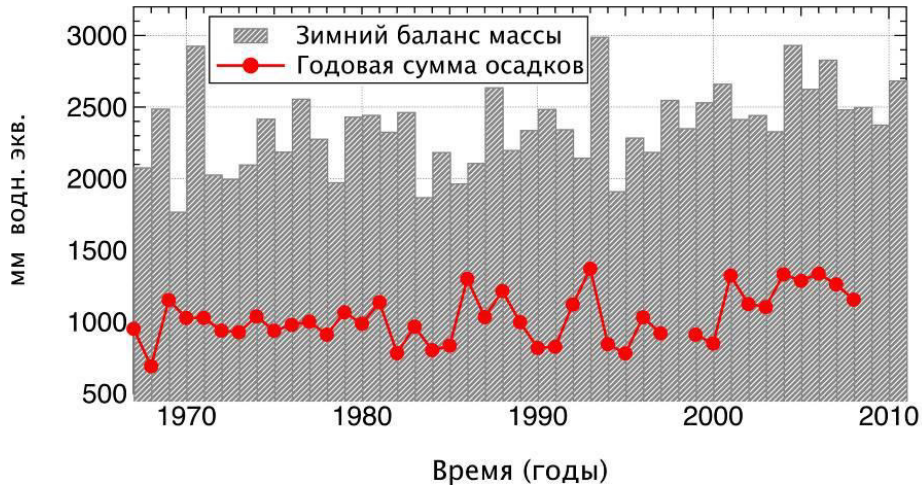


Рис. 4. Зимний баланс массы на леднике Джанкуат (мм водн. экв.) в период 1967/1968 – 2011/2012 балансовых годов и годовые суммы осадков (мм) на сетевой метеостанции Местиа

Расчет удельного баланса массы и ледникового стока. Удельный баланс массы горного ледника определяется как разность между аккумуляцией и стоком. Собственно, удельный баланс массы является конечной целью масс-балансовых расчетов, и используется в дальнейшем в качестве входной величины в динамической модели горного ледника [3]. Сток рассчитывается как разность между доступным количеством воды в жидкой фазе (сумма жидких атмосферных осадков и талой воды), из которых вычитается вторично замерзшая вода (внутреннее питание). Количество талой воды (величину абляции) и объем внутреннего питания будем рассчитывать в соответствии с алгоритмами, описанными в [11].

Для расчета аккумуляции необходимо определить оптимальные значения следующих нечетко определенных переменных:

– высотный градиент осадков;

– соотношение между годовой суммой осадков, измеренной на метеостанции Местиа и выпавшей на леднике;

– количество снега, перераспределенное в результате метелевого переноса с окружающих склонов;

– лавинное питание.

Значения всех перечисленных параметров были определены в серии численных экспериментов.

Результаты и их обсуждение. Величина абляции, полученная в модельных расчетах для балансового десятилетия 1999/2000 – 2008/2009, составляет 2975,8 мм водн. экв. Аналогичная величина, рассчитанная по данным промеров на абляционных рейках (В.В. Поповнин, частное сообщение), составило 3073,1 мм водн. экв. Удовлетворительное соответствие друг другу средних за балансовое десятилетие модельных и наблюденных значений не исключает того, что в отдельные годы различия довольно существенны (рис. 5а). В половине случаев модель предсказывает величины, очень близкие к наблюденным. В остальных случаях разница составляет 20–30%. В результате, с учетом неопределенностей в расчете величины аккумуляции, удельный баланс массы также рассчитывается с ошибкой. Характерно, однако, что модельный кумулятивный баланс массы практически совпадает с рассчитанным по данным наблюдений в последние два балансовых года (рис. 5б). Разумно предположить, что модели требуется некоторое время для релаксации к задаваемым извне климатическим условиям. Механизм подобной релаксации, заключается, по-видимому, во взаимном приспособлении полей толщины снежного покрова и альбедо поверхности к задаваемому полю температуры воздуха. Этим

можно объяснить и резкие колебания от года к году значений абляции.

Заключение. В статье была рассмотрена методика использования данных сетевых метеостанций для расчета составляющих баланса массы горного ледника. Основная сложность заключается в том, что значительная доля в приходной части баланса массы приходится на метелевый перенос и лавинное питание, величины которых меняются от года к году и от одного ледника к другому. В случае Джанкуата ситуация осложняется тем обстоятельством, что количество осадков в бассейне ледника приблизительно вдвое превышает годовые суммы, измеренные на ближайших сетевых метеостанциях.

Расчетные значения баланса массы зависят также от расчетных величин абляции. Последние в значительной степени определяются величиной альбедо поверхности. Хотя средняя величина, рассчитанная за балансовое десятилетие по результатам наблюдений, и модельная величина очень близки, значения в отдельные годы могут существенно различаться. Последнее обстоятельство означает, что необходимо провести дополнительное исследование чувствительности модели к методике параметризации альбедо поверхности.

В целом результаты проведенной работы позволяют сделать вывод о том, что модель, примененная для расчета баланса массы, после некоторой дальнейшей доводки может быть использована в прогностических расчетах с использованием динамической модели. Упомянутая доводка касается уточнения пространственного распределения компонентов баланса массы и сопоставления модельных и расчетных полей. В будущем мы также предполагаем дополнить алгоритм модельных расчетов блоком, описывающим теплообмен замороженных поверхностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-05-00567).

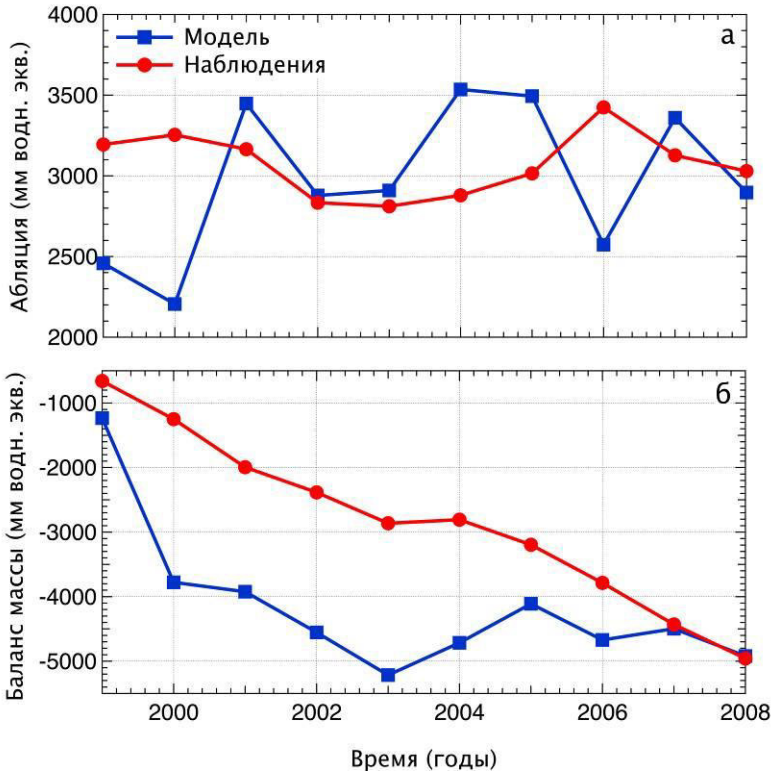


Рис. 5. Абляция на леднике Джанкуат (мм водн. экв.), согласно результатам наблюдений и моделирования (а) и кумулятивный баланс массы (б) в период 1999/2000 – 2008/2009 балансовых годов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Панов В.Д.* Эволюция оледенения современного Кавказа: дис. … д-ра геогр. наук. в виде науч. докл. Ростов н/Д.: РГУ, 2001. 58 с.

2. *Accelerated* glacier shrinkage in the Ak-Shyirak massif, Inner Tien Shan, during 2003–2013 / D. Petrakov, A. Shpuntova, A. Aleinikov [et al.] // Science of the Total Environment. 2016. V. 562. P. 364–378.

3. *Рыбак О.О.* Калибровка математической модели динамики ледника Марух, Западный Кавказ / О.О. Рыбак, Е.А. Рыбак, С.С. Кутузов [и др.] // Лед и снег. 2015. № 2 (130). С. 9–20.

4. *Морозова П.А., Рыбак О.О.* Использование данных регионального климатического моделирования для расчета баланса массы горных ледников // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. 2016. Вып. 5 (25). С. 84–89.

5. *Рец Е.П., Фролова Н.Л., Поповнин В.В.* Моделирование таяния поверхности горного ледника // Лед и Снег. 2011. № 4 (116). С. 24–31.

6. *Толщина*, объем льда и подледный рельеф ледника Джанкуат (Центральный Кавказ) / И.И. Лаврентьев, С.С. Кутузов, Д.А. Петраков [и др.] // Лед и Снег. 2014. № 4 (128). С. 7–19.

7. *Поповнин В.В., Пылаева Т.В.* Лавинное питание ледника Джанкуат // Лед и Снег. 2015. № 2 (130). С. 21–32.

8. *Лурье П.М., Панов В.Д., Ильичев Ю.Г.* Состояние современного оледенения северного склона Большого Кавказа на начало XX1 столетия // Устойчивое развитие горных территорий. 2010. № 3. С. 69–74.

9. *Dadic R.* Wind influence on snow depth distribution and accumulation over glaciers / R. Dadic, R. Mott, M. Lehning [et al.] // Journal of Geophysical Research. 2010. V. 115. F01012. Doi:10.10129/2009JF001261.

10. *Ледник* Джанкуат (Центральный Кавказ) / под ред. Г.Н. Голубева. Л: Гидрометеоиздат. 1978. 184 с.

11. *Рыбак О.О., Рыбак Е.А., Морозова П.А.* Моделирование и прогноз баланса массы горных ледников Центрального Кавказа в условиях климатических изменений // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. 2016. Вып. 6 (26). С. 93–100.

IMPLEMENTATION OF OBSERVATIONS AT REGULAR METEOROLOGICAL STATIONS FOR MASS BALANCE CALCULATION OF MOUNTAIN GLACIERS (CASE STUDY OF DJANKUAT GLACIER, CENTRAL CAUCAUS)

O.O. Rybak[1,2], E.A. Rybak[2,1]

[1]Branch of Institute of Natural and Technical Systems, Sochi, Kurortny Av., 99/18
[2]Sochi Scientific Research Center, Russian Academy of Sciences, Sochi, Theatralnaya St., 8a

To evaluate incoming and discharging parts of mass balance of a mountain glacier, one needs information on a set of variables. Surface air temperature can be relatively simply related to series of observations on regular weather stations. Evaluation of incoming mass is much more challenging problem. It depends not only on the amount of solid precipitation but also on post-depositional snow redistribution by wind and by input of avalanches. In the paper, we consider issues of evaluation of specific mass balance of Djankuat Glacier (Central Caucasus). Results of mathematical modeling are collated with snow observations and with examination of snow pits. We demonstrate that it is possible to find a relation between poorly constrained parameters determining winter snow accumulation to satisfactorily reconstruct cumulative mass balance.

Keywords: mountain glacier, Caucasus, climate, accumulation, ablation, mass balance, mathematical model.

УДК 913 (4):551.586

МЕТОДЫ БИОКЛИМАТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ КУРОРТОВ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД ГОДА

А.А. Стефанович, Е.Н. Воскресенская

Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: amazurenko@mail.ru, elena_voskr@mail.ru

В работе рассмотрены основные методы оценки биоклиматических условий курортных местностей. Проведен обзор наиболее популярных биоклиматических показателей, учитывающих региональные особенности областей, предназначенных для организации лечебно-оздоровительного отдыха и туризма. Представлены основные алгоритмы расчетов биоклиматических индексов. Определены наиболее эффективные методы, пригодные для характеристики медико-климатических условий на курортах Крымского полуострова в теплый период года, и выбраны наиболее перспективные индексы для анализа их климатической комфортности.
Ключевые слова: биоклиматические индексы, эквивалентно-эффективная температура, комфортность климатических условий, здоровье населения.

Введение. Климат – один из главных природных ресурсов, который может оказывать как благоприятное, так и негативное воздействие на окружающую среду и человека. Так, например, излишняя тепловая нагрузка в летнее время на Крымском полуострове представляет угрозу для состояния здоровья человека, находящегося на открытом воздухе. С помощью метеорологической информации можно оценить биоклиматические условия территорий и выявить возможное влияние климата на организм в конкретных регионах. От изменений биоклимата территорий зависит самочувствие и комфортность ощущений человека, его работоспособность и здоровье в целом. Наиболее объективная оценка особенностей биоклиматических условий производится на основе комплексного учета биоклиматических индексов.

Цель работы – определить наиболее эффективные методы оценки биоклиматических условий курортов Крымского полуострова в теплый период.

Основная часть. Для начала выясним, что собой представляет понятие «комфортность». Окружающая человека природа, географическая среда, является одним из постоянных и необходимых условий его существования и деятельности [1]. Она служит средой его обитания, важнейшим источником ресурсов, обеспечивающим человека теплом, воздухом, светом, пищей и водой, оказывает существенное влияние на самые различные стороны жизни общества. Одним из основных средообразующих факторов, создающих природно-ресурсный потенциал, является климатическая комфортность. Для сохранения здоровья человека и условий его жизни и деятельности она имеет большое значение.

Комфортность климатических условий – это оптимальное для человека состояние окружающей среды, обеспечивающее его здоровье и работоспособность. В своей монографии Андреев С.С. в понятие климатической комфортности, опираясь на восприятие и ощущение человеком влияющих на него условий, включает следующие определения [2]:

– «комфорт» – оптимальное психофизиологическое состояние человека, обеспечивающее его нормальную жизнедеятельность в местах постоянного или краткосрочного проживания;

– «субкомфорт» – слабораздражающие условия природной среды, в которых механизмы адаптации человеческого организма обеспечивают близкое к оптимальному психофизиологическое состояние человека, создавая ему условия для нормальной жизнедеятельности;

– «дискомфорт» – сильно раздражающие условия окружающей природной среды, когда физиологические механизмы адаптации человеческого организма не обеспечивают его оптимального психофизиологического состояния и требу-

ются дополнительные меры защиты, обеспечивающие нормальную жизнедеятельность.

Наиболее продолжительным сезоном в Крыму, благоприятным для активного рекреационного отдыха является летний сезон (от 130 до 160 дней в зависимости от части полуострова). Именно в этот период наблюдается поступление большого количества тепла. Устанавливается жаркая, ясная и маловетреная погода, на прибрежных территориях с более выраженным проявлением бризов, а в горах – горно-долинных и склоновых ветров. Континентальный воздух умеренных широт преобразуется здесь в местный тропический, в связи с чем, увеличивается повторяемость засушливых условий. Слишком высокие температуры оказывают негативное влияние на рекреационные условия. Так, в летний период повышается вероятность увеличения дней с пониженным содержанием кислорода и более интенсивным проявлением такого медико-климатического показателя как «душность». Свой вклад в изменения метеорологических параметров вносят и морские бризы, способные в жаркие дни понижать температуру воздуха на берегу более чем на 15-16ºС. Разнообразие климатических зон на территории Крымского полуострова благоприятствует организации лечебно-оздоровительного отдыха и туризма. Для эффективного проведения климатотерапии, включающей в себя дозированное воздействие метеорологических факторов, необходимо использовать ряд биоклиматических показателей – индикаторов. Это позволит адекватно оценить влияние погодно-климатических условий и особенностей местного климата на человеческий организм и выделить комфортные зоны, а также временные периоды для жизнедеятельности в курортный сезон.

В настоящее время для оценки влияния климатических факторов на состояние здоровья человека широко используются различные температурные шкалы, номограммы, коэффициенты, индексы и пр. В зависимости от сочетания элементов, входящих в биоклиматические индексы, их можно условно разделить на температурно-влажностные, температурно-ветровые, температурно-влажностно-ветровые (для теневых пространств и с учетом солнечной радиации), индексы патогенности и изменчивости погоды и климата, индексы континентальности климата, индексы, характеризующие состояние атмосферы [3]. В физическом отношении биоклиматические показатели характеризуют особенности тепловой структуры среды и являются косвенным определителем состояния теплового поля, окружающего человека. Главным метеорологическим параметром, составляющим основу всех биоклиматических индексов, является температура воздуха. Эффект от воздействия других климатических показателей выражается в виде поправки к температуре воздуха, учитывающей теплоощущения человека и состояния его комфортности [4].

Каждый из рассматриваемых ниже биоклиматических показателей рассчитывается для «среднего человека» и не учитывает индивидуальные особенности (механизмы адаптации). В результате анализа большого количества публикаций, посвященных воздействию погодных условий на самочувствие человека [5–8], отобран ряд биоклиматических показателей, максимально подходящих для оценки тепловой нагрузки в теплое время года и учитывающих региональные особенности Крымского полуострова.

Одинаково ощущать тепло можно при самых различных сочетаниях метеорологических параметров. Эмпирическим путем был получен ряд сочетаний температуры и относительной влажности, при которых эффект теплоотдачи и теплоощущения будет одинаковым. Такие сочетания выражаются в градусах эффективной температуры (ЭТ) – истинной температуры при неподвижном и насыщенном воздухе. Эффективная температура характеризует ощущение степени тепла или холода полураздетого (до пояса) человека. В России и за рубежом – это самый популярный показатель в биометеорологической практике, расчет которого производится по формуле А. Миссенарда [9]

$$ЭТ = t - 0{,}4(t - 10)(1 - \frac{f}{100}), \qquad (1)$$

где t – температура воздуха, °С; f – относительная влажность, %.

Данный биоклиматический показатель можно применять как для теплого, так и для холодного сезонов года.

Интенсивность теплоотдачи увеличивается в подвижном воздухе (при скорости ветра более 0,2 м/с), в связи с чем, изменяется и теплоощущение. В этом случае необходимо использовать эквивалентно-эффективную температуру (ЭЭТ), учитывающую комплексное влияние на человека температуры, влажности воздуха и скорости ветра. ЭЭТ рассчитывается по формуле А. Миссенарда [10]

$$ЭЭТ = ET = 37 - \frac{37 - t}{0{,}68 - 0{,}0014f + \frac{1}{1{,}76 + 1{,}4\upsilon^{0{,}75}}} - 0{,}29t(1 - \frac{f}{100}), \qquad (2)$$

где t – температура воздуха, °С; υ – скорость ветра, м/с; f – относительная влажность, %.

Для аналитической оценки теплоощущений одетого человека (одежда с теплоизоляцией 1 кло – платье, костюм и др.) И.В. Бутьевой была предложена нормальная эквивалентно-эффективная температура (НЭЭТ) [5]

$$НЭЭТ = 0{,}8 \cdot ЭЭТ + 7°С, \qquad (3)$$

где ЭЭТ – эквивалентно-эффективная температура, °С.

С помощью НЭЭТ одновременно учитывается влияние температуры, относительной влажности воздуха, скорости ветра на человека в весенне-осенний период. При температуре воздуха ниже +7ºС любой ветер (даже для одетого человека) является охлаждающим фактором, в связи с чем в формуле к ЭЭТ сделана поправка, равная 7ºС. Для оценки биоклиматического потенциала лечебно-оздоровительных курортов побережья Чёрного моря данный показатель очень уместен, так как курортный сезон на полуострове включает не только летние месяцы.

Радиационная эквивалентно-эффективная температура (РЭЭТ) оценивается как один из самых информационных индексов. По сравнению с ЭТ и ЭЭТ, данный показатель учитывает теплоощущения от нагрева солнечной радиацией. Формула для расчета РЭЭТ была предложена Г.В. Шелейховским и с уточнением В.И. Русанова [11]

$$РЭЭТ = 125\log[1 + 0{,}02T + 0{,}001(T - 8) \times \\ \times (f - 60) - 0{,}45(33 - T)\sqrt{\upsilon} + 185\beta], \qquad (4)$$

где T – температура воздуха, °С; f – относительная влажность, %; υ – скорость ветра, м/с; β – поглощенная поверхностью тела солнечная радиация, кВт/м^2; $\beta = \varepsilon(1\text{-}\alpha)$, где ε – интенсивность солнечной радиации; α – альбедо кожи человека.

В соответствии с рекомендациями Е.Г. Головиной и В.Н. Русанова РЭЭТ может быть рассчитана по упрощенным формулам [12]

$$РЭЭТ = НЭЭТ + 6{,}2°С, \qquad (5)$$

или

$$РЭЭТ = 0{,}83 \cdot ЭЭТ + 12°С, \qquad (6)$$

где НЭЭТ – нормальная эквивалентно-эффективная температура, °С; ЭЭТ – эквивалентно-эффективная температура, °С.

Значения РЭЭТ используются для характеристики климато-терапевтических свойств регионов. Благоприятным для отдыхающих считается РЭЭТ выше 25ºС.

Комплексное воздействие на человека температуры и влажности воздуха, скорости ветра, суммарной и длинноволновой радиации позволяет определить биологически активная температура (БАТ) [13], предложенная Е.В. Циценко

$$БАТ = 0{,}8 \cdot НЭЭТ + 9°С, \qquad (7)$$

где НЭЭТ – нормальная эквивалентно-эффективная температура, °С.

Поддержание жизненно важных функций организма человека невозможно без важнейшего элемента в природе – кислорода. Недостаточное количество кислорода в воздухе даёт ощущение духоты. Такой эффект человек может ощущать на себе как при высоких температурах, так и при высокой влажности воздуха. При более высоких температурах объём газа существенно увеличивается (воздух становится менее плотным), поэтому при вдохе в лёгкие попадает меньшее количество молекул кислорода, чем при более низкой температуре вдыхаемого воздуха. При повышенной влажности водяной пар вытесняет часть объёма воздуха при вдохе, из-за чего кислорода в легкие поступает меньше. Для любого периода года парциальная плотность (весовое содержание) (ρO_2) кислорода в атмосферном воздухе является важным биоклиматическим показателем для определения типа погоды. Его широко используют в медицинских прогнозах. Весовое содержание кислорода в воздухе можно определить по формуле [14]

$$pO_2 = \frac{P - e}{RT} 0{,}2315 \cdot 10^6, \qquad (8)$$

где P – атмосферное давление, мб; e – абсолютная влажность воздуха, мб; R – удельная газовая постоянная для сухого воздуха при давлении выраженном в мб, равная $2{,}87 \cdot 10^3$ см^2·с$^{-2}$·град$^{-1}$; T – абсолютная температура, равная 273°+температура воздуха, °С; 0,2315 – доля кислорода по весу в сухом воздухе; 10^6 – коэффициент перевода величин pO_2 из кг/м^3 в г/м^3.

Содержание кислорода в воздухе от 240 до 300 г/м3 считается нормой для человека [3]. Распределение парциальной плотности кислорода в воздухе во времени и пространстве имеет суточный и сезонный характер и проявляется в погодных аномалиях. Суточное отклонение данного показателя от средних значений (285 г/м3) на 10–15 г/м3 может отрицательно отразиться на самочувствии человека [15].

Окружающая среда, как уже упоминалось ранее, оказывает тепловое воздействие на организм человека. Поэтому в биоклиматологии большое внимание уделяется изучению влияния теплового режима атмосферы на систему терморегуляции человека. Для этих целей широко используется метод расчета величины теплового баланса тела (Q_s). С его помощью можно дать объективную оценку степени напряжения терморегуляционной системы человека. Для оценки теплового баланса использует формулу по Русанову [6]

$$Q_s = (S \frac{\operatorname{ctg} h}{\pi} + \frac{1}{2} D)(1 - \alpha) + \\ + M + 0{,}04 \cdot \text{ЭЭТ} - 0{,}98, \qquad (9)$$

где S – прямая солнечная радиация, кВт/м^2; D – рассеянная солнечная радиация, кВ/м^2; h – высота солнца, град.; α – альбедо непигментированной кожи, α=0,28; π=3,14; M – теплопродукция организма человека, кВт/м^2. Существует связь между интенсивностью теплового баланса человека и эквивалентно-эффективной температурой, которая описывается формулой

$$Q_s = 0{,}04 \cdot \text{ЭЭТ} - 0{,}98, \qquad (10)$$

где ЭЭТ – эквивалентно-эффективная температура, °С.

Для теплого периода года в основном используются методы анализа различного вида эффективных температур. Однако стоит отметить и такие биоклиматические показатели как индексы охлаждения или индексы холодового стресса, в которых эффект теплоощущения и дискомфорта рассчитывается не на основе влажности, как в эффективных температурах, а уточняется поправкой на скорость ветра. Согласно И. Арнольди [16], каждый метр скорости ветра понижает температуру на 2°С. Чаще всего в зарубежной практике используется ветровой индекс охлаждения Сайпла и Пассела [17], характеризующий степень охлаждения под влиянием ветра и температуры воздуха в тени, но не учитывающий испарение. Аналогичный индекс охлаждения Хилла (H_w) [7] характеризует интенсивность потерь тепла во влажном движущемся потоке воздуха

$$H_w = H_c + (0{,}085 + 0{,}0102\ \upsilon^{0{,}3}) \times \\ \times (61{,}1 - e)^{0{,}75}, \qquad (11)$$

где $H_c = (0{,}13 + \upsilon^{0,5})(36{,}6 - t)$, υ – скорость ветра, м/с; t – температура воздуха, °С; e – упругость водяного пара, гПа. В летний период при высоких положительных температурах воздействие влажного ветрового потока уменьшает ощущение дискомфортности человека [18].

Помимо индексов, отражающих тепловую и ветровую нагрузку на организм человека, существуют интегральные показатели, учитывающие различные характеристики погоды. Один из них – индекс патогенности метеорологической ситуации (I), предложенный В.Г. Бокшей [19], комплексно характеризующий степень раздражающего воздействия погодных факторов на человека. Индекс рассчитывается по формуле

$$I = I_t + I_h + I_\upsilon + I_n + I_{\Delta p} + I_{\Delta t}, \qquad (12)$$

где I_t – индекс патогенности температуры воздуха; $I_t = 0{,}02\ (18 - t)^2$ при $t < 18$°С и $I_t = 0{,}02\ (t - 18)^2$ при $t > 18$°С; t – среднесуточная температура, °С; $I_{\Delta t}$ – индекс патогенности межсуточного изменения температуры Δt; I_h – индекс патогенности влажности воздуха; h – среднесуточная относительная влажность (%); I_υ – индекс патогенности ветра; υ – среднесуточная скорость ветра (м/с); I_n – индекс патогенности продолжительности солнечного сияния; $n = 10–10 S_ф/S_{max}$; S_{max} и $S_ф$ – соответственно максимально возможная и фактическая продолжительность солнечного сияния; $I_{\Delta p}$ – индекс патогенности межсуточного изменения атмосферного давления Δp.

В.Г. Бокша предложил следующую рабочую формулу для расчета индекса патогенности метеорологической ситуации

$$I = 10^{\frac{h-70}{20}} + 0{,}2\upsilon^2 + 0{,}06n^2 + . \qquad (13)$$
$$+ 0{,}06(\Delta p)^2 + 0{,}3(\Delta t)^2 + I_t$$

Обобщая рассмотренные методические подходы, можно подвести следующий итог. Для характеристики теплоощущений человека наиболее информативными индексами для исследуемой территории является ряд эффективных температур – ЭТ, ЭЭТ, НЭЭТ, РЭЭТ, которые отражают реакцию человека на влияние комплекса гидрометеорологических параметров (температуры и влажности воздуха, скорости ветра), БАТ отражает влияние суммарной и длинноволновой радиации, ρO_2 – влияние парциальной плотности кислорода, Q_s – влияние теплового режима атмосферы на систему терморегуляции человека, H_w – действие охлаждающего эффекта ветра. Наиболее информативным показателем считается индекс патогенности I, так как он учитывает влияние максимального набора гидрометеопараметров, включающего температуру воздуха, влажность воздуха, среднесуточную относительную влажность, скорость ветра, продолжительность солнечного сияния.

Заключение. На основании анализа существующих методов оценки биоклиматических условий и природно-климатических факторов, характерных курортам Крымского полуострова, определены наиболее эффективные методы для определения климатической комфортности курортов Крыма в теплый период.

Показано, что приоритетными биоклиматическими показателями для территории Крымского полуострова в курортный сезон являются: эквивалентно-эффективной температура, нормальная эквивалентно-эффективная температура, радиационная эквивалентно-эффективная температура, биологически-активная температура, весовое содержание кислорода в воздухе, сальдо теплового баланса человека, ветровой индекс охлаждения, а также индекс патогенности метеорологических условий.

Предлагаемые методы оценки биоклиматических условий позволят не только комплексно охарактеризовать погодно-климатические условия прибрежных курортных местностей Крымского полуострова, но и выявить наиболее комфортные климатические зоны для оздоровления и отдыха местного населения и рекреантов, а также способствовать рациональному развитию туристской деятельности в регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дедю И.И.* Экологический энциклопедический словарь / И.И. Дедю. Кишинев: Главная редакция Молдавской советской энциклопедии, 1989. 408 с.

2. *Андреев С.С.* Климатическая комфортность территории и ее интегральная оценка, 2013. 276 с.

3. *Трубина М.А.*, *Хассо Л.А., Дячко Ж.К.* Методы биоклиматической оценки Северо-Западного региона России // Ученые записки ГГМУ: науч.-теорет. журнал. СПб.: Изд. РГГМУ, 2010. № 13. С. 121–137.

4. *Головина Е.Г., Трубина М.А.* Методика расчетов биометеорологических параметров (индексов). СПб, 1997. 23 с.

5. *Бутьева И.В.*, *Шейнова Т.Г.* Методические вопросы интегрального анализа медико-климатических условий // Комплексные биоклиматические исследования. М., 1988. С. 97–108.

6. *Головина Е.Г.*, *Русанов В.И.* Некоторые вопросы биометеорологии. Учеб. пос. СПб.: Изд. РГГМИ, 1993. 90 с.

7. *Исаев А.А.* Экологическая климатология. М.: Научный мир, 2001. 456 с.

8. *Изменения* климатических условий и ресурсов Среднего Поволжья: учебное пособие по региональной климатологии / Ю.П. Переведенцев, М.А. Верещагин, К.М. Шанталинский [и др.] / под науч. ред. Э.П. Наумова. Казань: Центр инновационных технологий, 2011. 296 с.

9. *Руководство* по специализированному климатологическому обслуживанию экономики [Текст] / под ред. д-ра геогр. наук, проф. Н.В. Кобышевой. СПб.: Росгидромет, 2008. 336 с.

10. *Хентшел Г.* Крупномасштабная и локальная классификация климата с точки зрения биометеорологии человека // Труды Международного симпозиума ВМО (ВОЗ) ЮНЕП. 1988. Т. 1. С. 139–159.

11. *Русанов В.И.* Методика исследований климата для медицинских целей. Томск, 1973. 274 с.

12. *Андреев С.С.* Экология человека. Ростов н/Д.: Изд. Е.А. Турова, 2007. 248 с.

13. *Григорьева Е.А.*, *Христофорова Н.К.* Дискомфортность климата Еврейской автономной области // География и природные ресурсы. 2004. № 4. С. 101–104.

14. *Формулы* и номограммы для расчетов медико-метеорологических показателей / Бутьева И.В., Галахова Э.Н., Ильичева Е.М. [и др.] // Материалы метеорологических исследований. М., 1984. № 8. С. 151–159.

15. *Овчарова В.Ф.* Гомеокинез в погодную гипоксию и гипероксию // Климат и здоровье человека: тез. докл. науч. конф. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. Т. 2. С. 142–149.

16. *Арнольди И.А.* Акклиматизация человека на севере и юге. М.: Медгиз, 1962. 71 с.

17. *Siple P.A.*, *Passel C.F.* Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures // Proc. Amer. Philos. Soc., 1945. Vol. 89. P. 177–199.

18. *Золотокрылин А.Н.*, *Канцебовская И.В., Кренке А.Н.* Районирование территории России по степени экстремальности природных условий для жизни человека // Известия РАН. Сер.: Геогр. 1992. № 6. С. 16–30.

19. *Бокша В.Г.* Проблема адаптации и курортное лечение. Л.,1983. 115 с.

METHODS OF BIOCLIMATE ASSESSMENT OF RESORTS CRIMEAN PENINSULA IN THE WARM PERIOD

A.A. Stefanovich, E.N. Voskresenskaya

Institute of Natural and Technical Systems, Russian Federation, Sevastopol, Lenin St., 28

The main methods for assessing of the bioclimatic conditions over the resorts area are studied in the paper. The most popular bioclimatic indicators for organization of medical and health-improving rest and tourism, taking into account the different regional climates, was reviewed. The main algorithms for bioclimatic indices calculation are presented. Most applicable methods for characteristics of medical-climatic conditions at the Crimea resorts during the warm recreation season were proposed. Most convenient bioclimatic indices for analyses of comfort of their recreation conditions are presented at the paper too.

Keywords: bioclimatic indices, equivalent-effective temperature, comfort of recreation conditions, human health.

УДК 574.632

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТОКОВ АДЛЕРСКОГО ПОЛИГОНА ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ НА БИОЦЕНОЗЫ РЕКИ ХЕРОТА

Н.К. Гудкова, Т.Л. Горбунова

Филиал Института природно-технических систем
г. Сочи, Курортный проспект, 99/18
E-mail: n.k.gud@yandex.ru , tatianashaw@mail.ru

Исследовалось влияние загрязненных стоков полигона ТКО на изменения состояния биоценозов р. Херота. Произведен детальный анализ предыдущих данных, описывающих экологическую проблему данного водоема, определены ключевые риски, связанные с полигоном, и изучено состояние бентосных и перифитонных сообществ макрозообентоса на протяжении реки. Основываясь на показаниях гидробиологического анализа, установлено, что биоценозы исследуемого водоема деградируют от верхнего течения к устью, начиная с точки поступления в него стоков полигона. Хотя Адлерский полигон г. Сочи официально закрыт, он продолжает оказывать негативное влияние на экосистему р. Херота, впадающую в Черное море. Применение биологических методов исследования позволило комплексно оценить воздействие загрязнения на живые организмы реки и определить зоны распространения влияния полигона.

Ключевые слова: полигоны твердых коммунальных отходов, комплексный мониторинг, биоценозы, экологическая опасность, сапробность, видовой состав.

Введение. Свалки и полигоны твердых коммунальных отходов (ТКО) являются объектами потенциальной экологической опасности для окружающей среды. Адлерский полигон ТКО расположен в балке на правом берегу р. Малая Херота, которая является правым притоком р. Херота. Река Херота имеет протяженность более 14 км и впадает в Черное море в районе пансионата «Известия» в Адлерском р-не г. Сочи. Экосистемы р. Херота и ее притока в настоящее время подвергаются влиянию загрязненных стоков целого ряда промышленных и сельскохозяйственных предприятий. Вызывает тревогу и тот факт, что в реку могут поступать загрязняющие вещества с полигона ТКО. Характер дна р. Хероты отличается от типичных горных рек региона тем, что многие участки реки имеют глинистые берега и дно. Кроме того, река частично взята в коллектор, что затрудняет установление стабильных биоценозов, изначально свойственных водоему, из-за смены донного субстрата. Целью данной работы является выявление и определение воздействия стоков Адлерского полигона ТКО на развитие биологических сообществ р. Хероты, а также идентификация других факторов, которые суммарно с загрязнением, поступающим с полигона, влияют на экологическую ситуацию водоема. Использование методов биоиндикации для решения поставленной задачи обеспечит комплексную интегральную оценку речных биоценозов и предоставят возможность зонирования и картирования р. Херота в зависимости от степени и типа антропогенного воздействия на нее и качественного изменения ее биоценозов на различных участках [1].

Материалы и методы. Для изучения и оценки проблемы загрязнения реки авторами произведен анализ предыдущих работ, отражающих состояние экологической ситуации данного водоема. Эти исследования включают в себя исторические данные гидрохимического анализа и оценку геоэкологических рисков в исследуемом районе. Для отбора проб были выбраны участки с каменистым дном для того, чтобы при последующем сравнении результатов анализов с другими исследуемыми водоемами, не допустить влияние изменения субстратов на биологический состав пробы. Со-

стояние субстрата, с которого отбирались пробы (характер обрастаний, заиление, наличие источников загрязнения вблизи точки отбора), обследовались визуально перед отбором. Отбор гидробиологических проб осуществлялся в соответствии с Руководством по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений [2].

Каждая проба отбиралась в трех повторностях с использованием рамки, ограничивающей площадь дна 0,25 м^2. Количество определенных видов и особей рассчитывалось на 1 м^2. Камни отбирались вручную с глубин от 0,2 до 0,3 м, еще в воде помещались в сачок из планктонного газа и переносились в таз для тщательного просмотра живой пробы. После этого живые организмы, отобранные с камней и из воды, оставшейся в тазу, помещались в банку с раствором этилового спирта (75%). В том случае, если на камнях наблюдались обрастания, они соскребались с камней в отдельные банки и фиксировались этиловым спиртом для дальнейшего определения гидробионтов. В лаборатории организмы зообентоса и перифитона определялись до вида [3, 4], после чего просчитывалась численность каждого вида и общая численность организмов в пробе. На основе определения видового и численного состава гидробионтов были вычислены биотические индексы – показатели сапробности воды, видового разнообразия и степени доминирования отдельных видов гидробионтов. На основе состава обнаруженных групп организмов, определялся индекс Вудивиса, который использовался как экспресс метод оценки качества водной среды. Для определения типа реки в зависимости от поступающего в него органического вещества и уровня процесса эвтрофикации, применялся сапробиологический анализ по Пантле и Буку. Для детального анализа изменений видового состава водоемов были рассчитаны параметры относительного обилия видов и степени доминирования отдельных видов: индекс Шеннона и индекс выравненности Пиелу [5].

Результаты исследования и обсуждение. Функциональным назначением полигона ТКО в Адлерском районе была приемка, складирование и изоляция муниципальных твердых коммунальных отходов, поступающих от жилого фонда г. Сочи. Адлерский полигон ТКО официально существует с 1953 г., однако сброс мусора в балку, впадающую в реку Малая Херота выше поселка Орел-Изумруд, начался еще до начала Великой Отечественной войны. За длительный период эксплуатации свалки, при значительных нарушениях требований к ее устройству и содержанию, произошло загрязнение окружающей среды: почвы, донные осадки и поверхностные воды на всей прилегающей к свалке территории были загрязнены нефтепродуктами и тяжелыми металлами. Таким образом, неудачное расположение этого объекта на берегу р. Малая Херота создавало целый ряд экологических и социальных проблем и оказывало устойчивое негативное воздействие на реку на протяжении многих десятилетий [6].

В 2004 г. был проведен экологический аудит Адлерского полигона, который выявил целый ряд нарушений природоохранного законодательства при складировании отходов на полигоне ТКО в долине р. Малая Херота, оценил сложившуюся ситуацию на полигоне ТКО, как чрезвычайную и обосновал необходимость закрытия и рекультивации этого экологически опасного объекта.

Экологическую опасность обуславливали следующие аспекты.

- Активные оползневые процессы в пределах свалочного тела и, как следствие, риск разрушения существующих зданий и сооружений.
- Риск перекрытия долины р. Малая Херота и затопления ее долины выше полигона ТКО и подтопление част-

ных домовладений, расположенных на ул. Петрозаводской.

- Эрозия берегов р. Малая Херота и частичное разрушение дорожного полотна на ул. Петрозаводской.
- Риски заболеваний для населения, проживающего на территориях, прилегающих к полигону ТКО.
- Бесконтрольное поступление токсичного свалочного фильтрата на прилегающую территорию и в р. Малая Херота.
- Бесконтрольная эмиссия токсичного свалочного газа и периодические самопроизвольные возгорания полигона ТКО, приводящие к задымлению прилегающих селитебных территорий, в том числе Адлерского курортного городка.
- Одним из существенных рисков является загрязнение воды и донных осадков реки Малая Херота, впадающей в р. Херота, а затем в Черное море.

В 2010 г. Адлерский полигон ТКО был закрыт и начались работы по его рекультивации, которая была завершена к концу 2012 г. В результате проведенных работ был организован сбор и отвод свалочного фильтрата с помощью системы вертикальных и горизонтальных дренажей. Эта система включала в себя систему сбора и транспортировки фильтрата из свалочного тела до очистных сооружений. Поднятый из скважины фильтрат самотеком по безнапорному трубопроводу стекает в приемный колодец очистных сооружений фильтрата, а оттуда в пруды-накопители. Из прудов производится забор фильтрата на очистку. Далее, по утвержденному проекту, фильтрат должен был поступать на очистные сооружения, а затем сбрасываться в р. Малая Херота. Изначально по проекту были предусмотрены очистные сооружения австрийского производства "Reverse Osmostis (RO) Plant", обеспечивающие высокую степень очистки фильтрата. Однако в процессе рекультивации вместо очистных сооружений, заявленных в проекте, на полигоне были установлены очистные сооружения "СОС", не проходившие государственную экологическую экспертизу. Для уточнения сложившейся ситуации, прокуратура Краснодарского края заказала исследование установленных на полигоне очистных сооружений ФГБУ "НИИ экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.М. Сысина". В полученном экспертном заключении говорится, что установленные очистные сооружения "СОС" обеспечивают невысокую степень очистки и давления, что может привести к недостаточной эффективности очистки сточных вод [7]. Следовательно, в р. Малая Херота может продолжаться сброс загрязняющих веществ, опасных для окружающей среды.

В рамках программы мониторинговых наблюдений за состоянием поверхностных вод рек, расположенных в зоне строительства Олимпийского комплекса г. Сочи, в мае 2014 г. ФГУ «Кубаньмониторингвод» произвел отбор проб воды для гидрохимических исследований в установленных створах наблюдений на р. Малая Херота: выше пос. Орел-Изумруд и ниже Адлерского полигона ТКО [8]. В воде р. Малая Херота в точке отбора, расположенной ниже Адлерского полигона ТКО, были выявлены превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) для рыбохозяйственных водоемов по целому ряду показателей: нитритам, фенолам, железу общему, нефтепродуктам, ХПК и БПК5. Данный факт может быть обусловлен маловодностью реки и возможным поступлением загрязняющих веществ с полигона ТКО. Причем, качество воды р. Малая Херота в этой точке отбора ухудшилось по сравнению с апрелем 2014 г. по следующим показателям: БПК5, ХПК, аммоний-иону, нитрит-иону и нефтепродуктам.

Для уточнения влияния Адлерского полигона ТБО на р. Малая Херота в марте 2015 г. нами был проведен отбор проб воды из реки как выше, так и ниже Адлерского полигона ТБО. Аналитические исследования отобранных проб воды проводились в химической лаборатории территориального управления Роспотребнадзора. В табл. 1 показано содержание основных загрязняющих веществ в воде р. Малая Херота.

Таблица 1. Содержание основных загрязняющих веществ в воде р. Малая Херота

Показатели	Вода р. Малая Херота выше полигона ТКО (март 2015 г.)	Вода р. Малая Херота ниже полигона ТКО (март 2015 г.)	Величина допустимого уровня для рыбохоз. вод.
Водородный показатель, ед. pH	7,71	7,58	6,5 – 8,5
Минерализация общая (сухой остаток), мг/дм^3	288,0	306,0	1000
СПАВ, мг/дм^3	<0,5	0,014	не более 0,5
Нефтепродукты, мг/дм^3	0,05	0,07	не более 0,05
Биологическое потребление кислорода (БПК), мгО/дм^3	1,42	2,1	не более 4,0
Окисляемость перманганатная, мгО/дм^3	2,48	3,36	не более 5,0

Анализ полученных результатов показал, что в точке отбора речной воды, расположенной ниже полигона ТКО, было выявлено превышение предельно допустимых концентраций содержания нефтепродуктов для рыбохозяйственных водоемов. Нефтепродукты относятся к числу наиболее распространённых и опасных веществ, загрязняющих поверхностные воды. Учитывая данные исследований, проведенных весной 2014-2015 гг., можно сделать вывод о том, что очистные сооружения Адлерского полигона ТКО работают не достаточно эффективно и в р. Малая Херота продолжают поступать загрязняющие вещества.

Следует отметить, что р. Херота в течение последних десятилетий испытывает постоянно возрастающую антропогенную нагрузку. Помимо полигона ТКО, целый ряд других техногенных объектов могут сбрасывать отходы своей деятельности в р. Херота. Наибольшую экологическую опасность представляют объекты топливно-энергетического комплекса. Это крупные склады горюче смазочных материалов, воинской части и котельной № 19, расположенные на правом берегу р. Херота. Кроме того, в среднем течении р. Херота потенциальными загрязнителями могут являться завод железобетонных изделий, тепличные хозяйства, склады строительных компаний и различные объекты пищевой промышленности (хлебозавод, винзавод, пищекомбинат, столовые, кафе и т.д.), расположенные по обеим сторонам реки. В нижнем течении р. Херота протекает через густонаселенный микрорайон г. Сочи и пересекает автомагистраль федерального значения, поэтому не малый вклад в загрязнение на этом участке реки вносит транспортная инфраструктура города и селитебная зона, в которой отсутствует централизованная система канализования домов.

Наблюдения, произведенные авторами на участке реки в верхнем течении в 2016-2017 гг., показали, что каменистый субстрат на этой станции был незначительно заилен, наблюдались обильные обрастания камней зелеными водорослями. При отборе пробы из устья реки наблюдалось чрезвычайно сильное заиление донного субстрата и обильные

слизистые обрастания серо-коричневого цвета. В некоторых местах толщина илистых и детритных седиментов поверх камней составляла до 2 см. Такие изменения субстрата, как правило, приводят к сокращению обилия донных организмов, так как не позволяют им прикрепление к поверхности и затрудняют их питание. Кроме того, илистые отложения способны адсорбировать токсичные вещества из воды и аккумулировать их, что со временем приводит к полной деградации донных биоценозов [9].

В ходе исследования на р. Херота, были выделены три основные, отличающиеся по биологическому составу участка: верхнее течение реки, среднее (район пос. Орел-Изумруд) и приустьевая зона. Эти участки отличаются по значениям биотического индекса Вудивиса и сапробному индексу: в устье реки индекс Вудивиса был в среднем 1,5, а индекс сапробности – 3,76, что характеризует реку как сильно загрязненный полисапробный водоем, где чрезвычайно снижено видовое разнообразие и практически остановлены процессы естественного самоочищения. В среднем течении индекс Вудивиса – 6, а индекс сапробности – 2,29, представляющий реку как умеренно загрязненный водоем в зоне β-мезосапробности с интенсивными процессами самоочищения и относительно богатым видовым составом. На участке реки выше зоны воздействия стоков с полгона ТКО индекс Вудивиса был 8, характеризуя реку как чистый водоем, а индекс сапробности – 2,21, относя этот участок к β-мезосапробной зоне, так же как и предыдущую пробу. Такие показатели обусловлены тем, что в пробе выше по течению видовое разнообразие ручейников и веснянок было выше, и по этим признакам проба по индексу Вудивиса характеризовалась как чистая. Относительное видовое разнообразие биологических сообществ также было использовано как индикатор воздействия неблагоприятных факторов на среду. За время исследования в пробах из устья р. Херота было определено всего 4 вида организмов макрозообентоса. В то же время в ее среднем течении было обнаружено 10, а в верхнем течении – 12 видов, что указывает на катастрофическое обеднение видового состава биоценоза в устье реки по сравнению с сообществами ее верхнего течения. В среднем за время исследования, значение индекса Шеннона в устье реки было 1,01, в среднем течении – 2,64, а в верхнем течении – 2,97. Значения индекса выравненности Пиелу повышались от устья к верхней точке отбора, что свидетельствует об увеличивающейся значимости обычных (не доминантных) видов в пробах среднего и верхнего течения реки по сравнению с ее устьем. Как показано на диаграмме (рис. 1), в устье реки присутствуют только три группы гидробионтов, устойчивых к эвтрофикации. Численно преобладают представители двукрылых, *Diptera* (*Chironomus Plumosus*) и олигохеты (*Tubifex Tubifex*) с незначительным присутствием представителей брюхоногих моллюсков, представленных единственным видом прудовиков (*Physa fontinalis*).

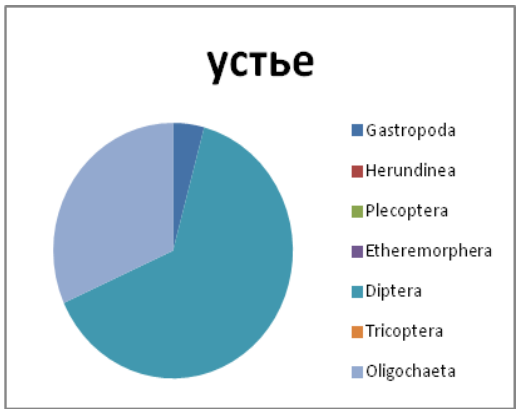


Рис. 1. Видовое разнообразие макрозообентоса и перифитона в пробах устья р. Херота

Для среднего течения реки (рис. 2) характерно большее видовое разнообразие, однако, остается значительным преобладание одной доминирующей группы (*Diptera*). Эта группа, в отличие от устьевого участка, содержит несколько видов двукрылых с различной толерантностью к органическому загрязнению. В пробе присутствуют еще 6 групп гидробионтов, формирующих биоценоз, характеризующийся интенсивными процессами самоочищения водоема.

Рис. 2. Видовое разнообразие макрозообентоса и перифитона в пробах среднего течения р. Херота

В пробе с участка реки выше полигона (рис. 3) наблюдается большая, чем в предыдущей пробе стабильность развития нескольких крупных таксонов. Хотя доминирующая группа в этой пробе занимает 50% от общей численности гидробионтов, получили развитие и заняли свою нишу другие группы водных организмов, включая виды, характерные для чистых вод (*Etheremorphera, Plecoptera, Tricoptera*).

Рис. 3. Видовое разнообразие макрозообентоса и перифитона в пробах среднего течения р. Херота

Выводы. Адлерский полигон ТКО г. Сочи официально закрыт, но продолжает оказывать негативное воздействие на экосистему р. Херота.

На объектах складирования отходов должен проводиться экологический мониторинг. Однако на сегодняшний день отсутствует систематизированная научно обоснованная методика проведения мониторинговых исследований полигонов и свалок ТКО, что не позволяет в полной мере оценить их экологическую безопасность.

В настоящее время работа по оценке влияния стоков свалок бытовых отходов на речные биологические сообщества продолжается для установления степени токсической нагрузки и сезонной динамики изменений этих биоценозов.

Использование методов биоиндикации позволило комплексно и интегрально оценить негативное воздействие на биоценозы реки и провести зонирование загрязнения природного водоема.

Гидробиологический анализ биоценозов реки свидетельствует, что ее биологические сообщества деградируют от верхнего течения к устью, начиная с точки поступления в реку инфильтратов с полигона ТКО. Ситуация ухудшается к устью реки, так как, кроме стоков с полигона, на реку оказывают нагрузку стоки промышленных предприятий и бытовые хозфекальные стоки не канализованного жилого сектора ниже по течению. В результате аддитивного воздействия, биоценозы устья реки Херота полностью деградировали, и на этом участке река утратила способность к самоочищению [10].

Важно отметить, что с повышением температуры воды в летний период увеличивается реакционная способность загрязнителей, поступающих в водоем. Кроме того, в летний период обычно уменьшается естественный водоток реки, что ограничивает возможность разбавления токсичных и эвтрофированных стоков до безопасного уровня. Поэтому полисапробная зона реки может прогрессировать вверх по течению, вызывая дальнейшую деградацию природного водоема.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горбунова Т.Л.* Биоиндикация в системе мониторинга окружающей среды при переходе к устойчивому развитию агломерата города-курорта Сочи // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ИПТС. 2016. Вып. 5 (25). С. 94–102.

2. *Абакумов В.А*. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений // Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды. Л.: Гидрометеоиздат. 1983. 240 с.

3. *Цалолихин С.Я.* Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий: в 6-ти т. / ред. С.Я. Цалолихин. СПб.: Наука, 1997–2000.

4. *Шалапенок Е.С.*, *Мелешко Ж.Е.* Краткий определитель водных беспозвоночных животных: учеб. пособие для студентов биол. фак-та. Минск: Белорусский гос. ун-т, 2005. 241 с.

5. *Розенберг Г.С.*, *Рянский Ф.Н.* Теоретическая и прикладная экология. Нижневартовск: Изд-во Нижневартовского пед. ин-та. 2005. 292 с.

6. *Гудкова Н.К., Крассовская С.П.* О проблеме утилизации и управления отходами г. Сочи // Успехи современного естествознания. 2006. № 9. С. 36–38.

7. *Кулаева А.* Рекультивация Адлерской свалки завершена, но вопрос ее влияния на окружающую среду не закрыт [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.ewnc.org/node/9179, свободный (дата обращения: 28.06.2017).

8. *Результаты* гидрохимических наблюдений за состоянием поверхностных вод рек, расположенных в зоне строительства Олимпийского комплекса г. Сочи. 2011. [электронный ресурс]. Режим доступа: http://voda.mnr.gov.ru/activities/detail.php?ID=6021, свободный (дата обращения: 02.04.2017).

9. *Зиновьев Е.А.*, *Китаев А.В.* О воздействии взвешенных частиц на гидрофауну // Известия Самарского научного центра РАН. 2015. Т. 1, № 5. С. 283–288.

10. *Остроумов С.А*. Биологический механизм самоочищения в природных водоемах и водотоках: теория и практика // Успехи современной биологии. М.: Наука. 2004. Т. 124, № 5. С. 429–442.

ASSESSMENT OF IMPACT OF ADLERSKY LANDFILL OF SOLID MUNICIPAL WASTE EFFLUENT TO THE RIVER HEROTA BIOCENOSES

N.K. Gudkova, T.L. Gorbunova

Branch of the Institute of Natural and Technical Systems,
Russian Federation, Sochi, Kurortny Av., 99/18

Impact of polluted effluents from solid municipal communal waste landfill to changes of river Kherota biocenoses had been investigated. Thorough analysis of the previous data, which describe this reservoir's ecological problem, was made, the key risks connected to the waste dump were identified and conditions of the benthos and periphyton macrozoobetos communities were studied along the river's flow. Basing on the results of hydrobiological analysis, it is found that the biocoenoses of the assessed reservoir are degrading from its upper flow to mouth, starting from the point of waste dump effluents discharge. Although Adler's waste dump of town Sochi is officially closed, it is continuing providing negative impact to the ecosystem of river Kherota, which flowing into the Black Sea. Application of biological research methods allowed comprehensive assessment of the pollution affects on living organisms in river and determine the impact area of the landfill.

Keywords: solid municipal communal waste landfill, integrated monitoring, biocoenoses, environmental hazards, saprobity, species composition.

УДК 502.53:581.5/630*905.2:[502/47+630*907.32](1-924.71)

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ЛЕСНОГО ФОНДА СЕВАСТОПОЛЬСКОГО РЕГИОНА

С.И. Рубцова

Институт природно-технических систем
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: rsi1976@mail.ru

Анализ лесных площадей в административных границах Севастополя показал значительное снижение площади лесных массивов Севастополя с 37,6 тыс. га в 2005 г. до 34,4 тыс. га в 2015 г. Установлена тенденция сокращения площадей и количества зеленых насаждений в Севастополе. Определены основные недостатки в области лесопользования в Севастопольском регионе.
Ключевые слова: лесной фонд, лесное хозяйство, особо-охраняемые природные территории (ООПТ), Крымский полуостров, Севастополь.

Введение. В последние годы прослеживается тенденция сокращения площадей и количества зеленых насаждений г. Севастополя. К сожалению, тема лесов и зеленых насаждений Севастополя изучена весьма слабо. В современной литературе существует ряд работ, посвященных особо охраняемым природным территориям (ООПТ), призванным выполнять функцию сохранения природных экосистем в их естественном состоянии, представляя “эталоны” природы, всех ее компонентов, в том числе и биоразнообразия [1–6]. Цель исследования – анализ современного состояния и ретроспективный анализ качественных и количественных показателей лесного фонда Севастопольского региона за последние 15 лет.

Материал и методы. В работе использованы статистические материалы и отчеты за период с 2001 по 2016 гг., предоставленные Главным управлением природных ресурсов г. Севастополя, данные Государственного казенного учреждения Севастополя «Севастопольское лесничество», Генеральный план Севастополя (2005 г.), проект Генерального плана Севастополя (2017 г.) [6–15].

Результаты и обсуждение. В г. Севастополе леса и другие лесопокрытые площади занимают 40,9% территории в административных границах Севастополя, в том числе в ведении: Государственного казенного учреждения Севастополя «Севастопольское лесничество» – 39,7%; агропромышленных предприятий и других пользователей (Министерство обороны России, рекреационные объекты) – 1,2%.

На долю основного постоянного лесопользователя – Севастопольского лесничества, приходится 34,3 тыс. га. Леса и лесные участки, переданные в ведение Севастопольского лесничества, находятся на землях населенных пунктов и относятся к защитным лесам – 34332 га [7, 8], в том числе: леса, расположенные на особо охраняемых природных территориях – 14941,8 га; леса, выполняющие функции защиты природных и иных объектов – 2068,5 га; ценные леса – 17321,7 га (рис. 1).

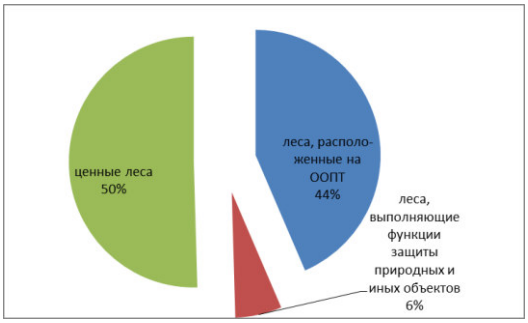


Рис. 1. Функциональная диаграмма лесов Севастополя

На рис. 2 представлена динамика общей площади земель лесного фонда Севастополя, начиная с 2005 г.

С 2005 г. общая площадь лесопокрытых площадей земель лесного фонда г. Севастополя значительно уменьшилась с 37,6 тыс. га в 2005 г. до 34,4 тыс. га в 2015 г. [7]. Это можно объяснить вырубкой леса, пожарами и др.

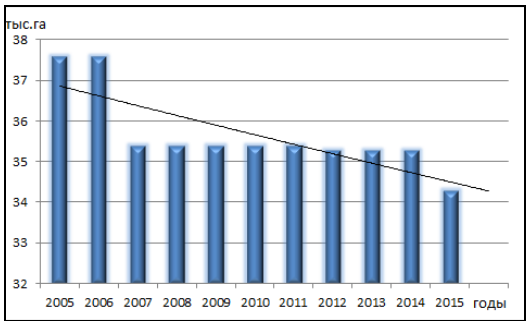


Рис. 2. Динамика общей площади земель лесного фонда Севастопольского региона

Для сравнения, в 2015 г. в лесных насаждениях, переданных в пользование Севастопольского лесничества, были проведены санитарно-оздоровительные мероприятия на общей площади 138,39 га, из них: выборочных санитарных рубок – 35,8 га с вырубленным объемом древесины 526 м³; проходных рубок – 10,6 га, объем древесины составил 407 м³; рубок обновления – 91,99 га, объем срубленной древесины – 3654 м³ [7]. Отмечается тенденция уменьшения площадей леса с 2001 г. по настоящее время, в основном, за счет вырубки и лесных пожаров (рис. 3). Примечательно, что уменьшение лесов коснулось в большей части хвойных пород леса, чем лиственных.

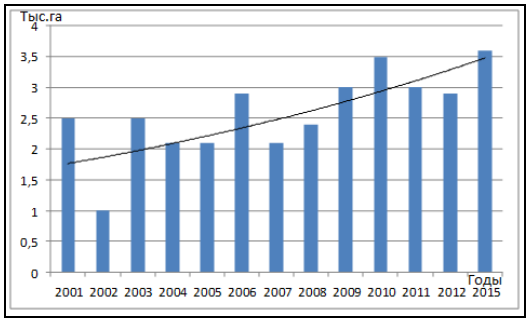


Рис. 3. Гибель лесов в результате вырубки и лесных пожаров с 2001 по 2015 гг.

Только за 2015 г. в лесных насаждениях произошло 28 лесных пожаров. Общая площадь, пройденная огнем, составила – 3,32 га. Наиболее подвержены пожарам лесные участки, на которых произрастают хвойные породы. Общая площадь хвойных лесов 8997 га, что составляет 26% от общей площади лесничества [7]. Класс пожарной опасности в вышеуказанных хвойных лесах очень высокий и относится к первому классу.

Анализируя динамику лесоразведения и создания защитных лесонасаждений с 2001 по 2012 гг., какую-либо зависимость выделить трудно (рис. 4).

Все леса Севастополя отнесены к первой группе и особо ценным лесным массивам. Учитывая особую роль лесов Крыма, Совет Министров СССР постановлением № 401 от 16.04.1956 г. отнес их к лесам с особым режимом лесопользования (эксплуатационные леса) и запретил проведение в них всех видов рубок. Поэтому в лесах Севастополя рубки главного пользования запрещены, проводятся только рубки ухода, санитарные и прочие рубки.

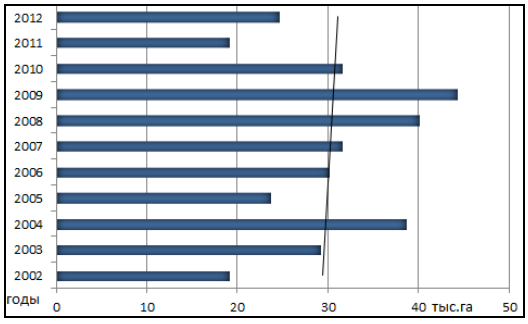


Рис. 4. Динамика лесоразведения и создания защитных лесонасаждений с 2001 по 2012 гг.

Особо охраняемые природные территории (ООПТ) призваны выполнять функцию сохранения природных экосистем в их естественном состоянии, представляя “эталоны” природы, всех ее компонентов, в том числе и биоразнообразия [1–6]. Системы ООПТ разных стран и регионов представлены категориями, отличающимися режимами охраны, ее «строгостью»: от полного запрета на любые виды хозяйственной деятельности (заповедники) до сохранения возможности ведения традиционного хозяйства. Как результат, в зависимости от категории ООПТ, помимо природоохранной функции, в их границах могут

сохраняться и развиваться другие типы природопользования: рекреационное, сельскохозяйственное, транспортное и т.п. [1]. Региональные особенности природопользования на ООПТ зависят также от исторически сложившейся структуры хозяйства и расселения, местной нормативно-правовой базы.

Природопользование на ООПТ осуществляется на основе зонирования их территории по выполняемым функциям и разработки режимов использования. Наиболее ценные и уникальные природные комплексы входят в состав заповедных ядер, которые используются только для научно-учебных и природоохранных целей. Менее ценные участки входят в рекреационные зоны. Хозяйственные зоны на ООПТ создаются на участках, не представляющих высокой природоохранной ценности [1].

Обычно спектр типов природопользования, допустимых на ООПТ, не слишком велик и представлен, преимущественно, сельскохозяйственным, лесохозяйственным и рекреационным.

Разнообразие использования ООПТ в хозяйственной жизни Крымского полуострова позволяет говорить о сложной структуре природопользования, представленной разными типами и формами размещения. Анализ этих аспектов необходим для оптимизации природопользования и минимизации конфликтов [2–6].

Территория Севастополя, уникальная по соотношению площади особо охраняемых природных территорий, с общей площадью региона составляет 30,36% территории имеющей статус ООПТ. По состоянию на 01.01.2015 в г. Севастополе расположено 12 особо ООПТ различных категорий общей площадью 26,241 тыс. га, а именно [8]:

– 4 государственных природных заказника: 3 ландшафтных – «Байдарский», «Мыс Айя», «Мыс Фиолент» и 1 общезоологический – «Бухта Казачья»;

– 1 региональный ландшафтный парк «Максимова дача»;

– 1 заповедное урочище («Скалы Ласпи»);

– 6 памятников природы (1 ботанический – «Ушакова балка»; 1 комплексный – «Мыс Фиолент» и 4 гидрологических – прибрежные аквальные комплексы у мысов Лукулл, Фиолент, Сарыч и возле Национального археологического заповедника «Херсонес Таврический»).

Общая площадь государственных природных заказников (4 объекта) составляет 25,6899 тыс. га.

Общая площадь памятников природы (7 объектов) составляет 0,467 тыс. га. Площадь природного ландшафтного парка «Максимова дача» составляет 0,083 тыс. га.

ООПТ, существовавшие на территории г. Севастополя на момент принятия в состав Российской Федерации, сохраняются в прежних границах и являются собственностью города (письмо Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации «Об ООПТ города Севастополя» от 16.02.2015 № 12-59/3450) [8].

На рис. 5 представлен природно-экологический каркас Севастополя с землями Лесного фонда (проект Генплана 2017 г. [16]), в том числе леса, расположенные на ООПТ, лесопарковые зоны, городские леса, леса санитарной охраны, ценные леса, противоэрозионные леса, леса, имеющие научное и научно-историческое значение, защитные леса, не входящие в состав Лесного фонда. Для сравнения, согласно Генплана г. Севастополя (2005 г.), в административных границах 42,5 тыс. га занято под зелеными насаждениями (без учета сельскохозяйственных насаждений и садовых товариществ). Из них городские насаждения составляют 4,2 тыс. га (10,7%), пригородные насаждения – 38,5 тыс. га (в т.ч. лесной фонд – 35,3 тыс. га, или 82,%; защитные насаждения агропромышленного комплекса – 3,0 тыс. га, или 7,0%). Городские зеленые насаждения всех видов по г. Севастополю составляют 123,1 м² на 1 жителя зоны городской застройки – при норме 20 м². В том числе городских лесов числятся 2050,1 га; зеленые насаждения застроенной территории города составляют 2117 га (данные подлежат уточнению по результатам инвентаризации) из них:

– зеленые насаждения общего пользования (парки, скверы, бульвары) – 390,5 га, всего 124 объекта, с включением ведомственных насаждений – 360,3 га;

– насаждения ограниченного пользования (внутриквартальное озеленение, внутренние насаждения промышленных территорий, насаждения на участках общественных учреждений) – 1484,8 га;

– насаждения специального назначения (санитарно-защитных и охранных зон, уличное озеленение, посадка на действующих и закрытых кладбищах) – 272,1 га [7].

К основным лесообразующим породам Севастопольских лесов относятся: хвойные породы деревьев (сосна Палласа (крымская), сосна пицундская (Станкевича, судакская), можжевельник высокий, можжевельник колючий); твердолиственные породы (дуб пушистый, дуб скальный, бук, граб, ясень, клен, вяз и другие ильмовые, акация белая); мягколиственные породы: (осина).

В настоящее время флора Севастополя включает 1859 видов и подвидов сосудистых растений, что составляет 73% флоры Крыма.

В границах г. Севастополя произрастают редкие виды, которые не встречаются на территории Крымского полуострова, среди них меч-трава обыкновенная *Cladium mariscus,* камыш Ипполита *Scirpus hippolytii.* Только в районе Севастополя отмечены известные для Восточной Европы виды – годэния ломкая *Gaudinia fragilis*; ячмень ржаной *Hordeum secalinum*; очиток очитковидный *Sedum sediforme*; пажитник четковидный *Trigonella strangulata*; донник индийский *Melilotus indicus*; клевер иглистый *Trifolium echinatum*; подковник хохлатый *Hippocrepis comosa*; чечевица восточная *Lens orientalis*; лагеция кминовидная *Lagoecia cuminoides*; коровяк волнистый *Verbascum undulatum*; парентучеллия желтоцветковая *Parentucellia latifolia;* подорожник перистолопастный *Plantago coronopus*, валерианелла коротковенцовая *Valerianella brachystephana;* кульбаба скальная *Leontodon saxatilis*; геропогон гибридный *Geropogon hybridus*; козлобородник высокий *Tragopogon elatior*; одуванчик ложномурбеков *Taraxacum pseudomurbeckianum* [7].

На территории г. Севастополя встречаются также эндемики флоры Крыма, например, ковыль камнелюбивый *Stipa eriocaulis subsp. lithophila*, гвоздика Маршалла *Dianthus marschallii*, чабер крымский *Satureja taurica*, ясменник дернистый *Asperula supina subsp. caespitans,* вероника крымская *Veronica taurica subsp. taurica* и др.

На территории г. Севастополя обитает около 180 видов объектов растительного и животного мира, предполагаемых к занесению в Красную книгу г. Севастополя, в том числе эндемики, уникальные для флоры Крыма, и находящиеся под угрозой уничтожения, например, можжевельник дельтовидный (колючий) *Juniperus deltoides*, более 50 из них занесены в Красную книгу Российской Федерации, в том числе фисташка тополистная *Pistacia mutica* и др.

В Красный список исчезаемых растений Международного союза охраны природы (МСОП) занесены кизильник крымский *Cotoneaster tauricus,* крокус узколистный *Crocus angustifolius,* дельфиниум Палласа *Delphinium pallasii,* румия критмолистная *Rumia crithmifolia* и др.

Из таксонов, включенных в Европейский красный список, на территории г. Севастополя произрастают кизильник крымский Cotoneaster tauricus, подснежник складчатый *Galanthus plicatus*, ремнелепестник козий *Himantoglossum caprinum,* румия критмолистная *Rumia crithmifolia, скабиоза* предгорная *Scabiosa praemontana*, чабрец Дзевановского *Thymus dzevanovskyi* [7].

Согласно Бернской конвенции (1976) – «Конвенции об охране дикой флоры и фауны, а также их природных мест обитания в Европе», охраняются компария *Компера Comperia comperiana*, ремнелепестник козий *Himantoglossum caprinum,* рогоз Шатлеворта *Typha schuttleworthii* и др.[7].

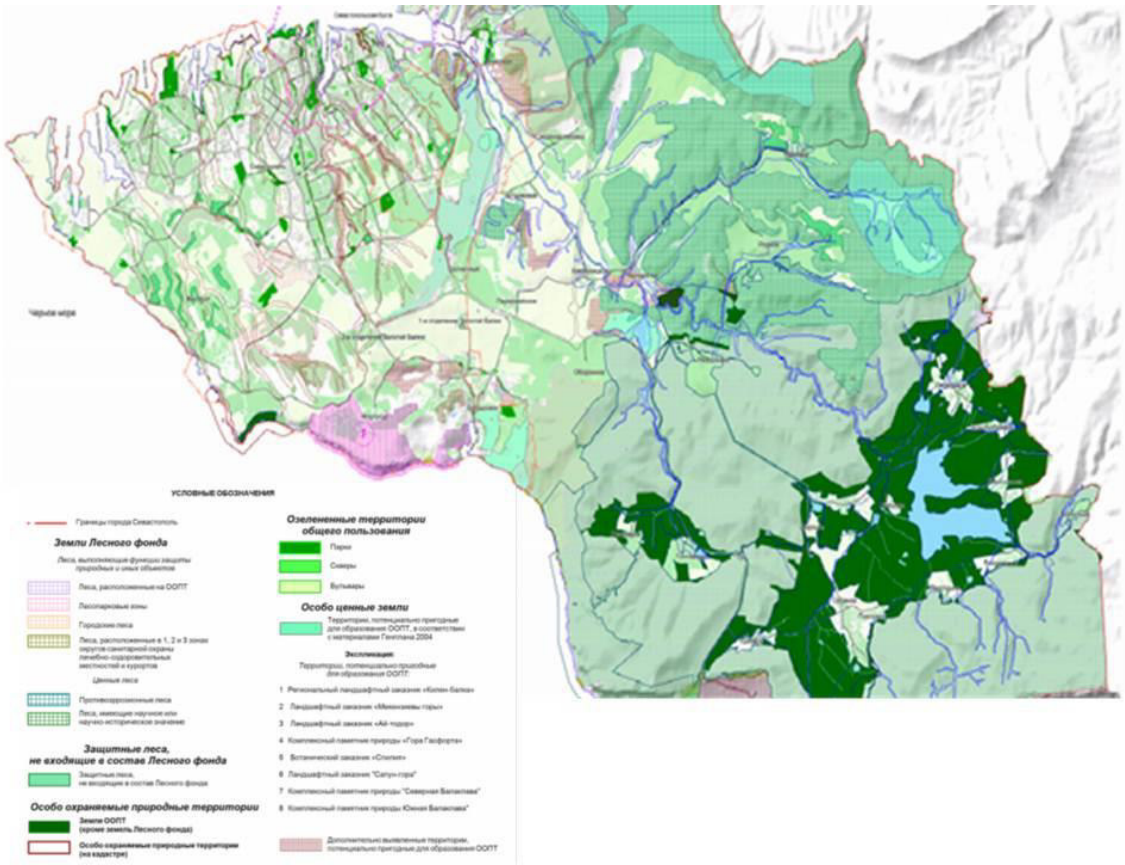


Рис. 5. Природно-экологический каркас г. Севастополя за 2017 г. [16]

Основные направления развития лесного хозяйства обусловливаются средообразующими, водоохранными функциями леса, обусловленными грунтозащищающими, водорегулирующими, культурно-эстетическими и другими защитными свойствами [7].

Недостатки в сфере ведения лесного хозяйства в регионе являются: проведение не в полном объеме мероприятий по повышению производительности лесов, несвоевременные вырубки горельников, повреждение подроста в лесах, засорение леса отходами – привели к ослаблению биологических и защитных функций леса [7, 8]. Имеют место самовольные рубки, усушка древостоя, поражение деревьев болезнями и вредителями растений, пожарами, при этом погибшие деревья не вырубаются.

На предприятиях агропромышленного комплекса учет лесов не ведется, также не проводятся мероприятия по охране и защите леса. Специальные службы по воспроизводству и охране лесных насаждений отсутствуют. В городских лесах и лесозащитных насаждениях, расположенных в пределах населенных пунктов, не относящихся к лесным участкам, переданным в ведение Севастопольского лесничества, но не предоставленных другим пользователям, не проводятся мероприятия по охране, защите и содержанию насаждений.

В последние годы прослеживается четкая тенденция сокращения площадей и количества зеленых насаждений г. Севастополя, что в первую очередь связано со сносом засохших и аварийных деревьев. Основной причиной сноса аварийных деревьев есть их возраст (который для многих быстрорастущих деревьев достиг или достигает предельного, по-

тому что основные посадки осуществлялись около 50 лет назад).

Снос зеленых насаждений в основном происходит в связи с уплотнением застройки в городе. В отдаленных районах и на придомовых территориях централизованно восстановительные посадки не проводятся. К сожалению, учет площади зеленых насаждений, предоставленных под застройку и другие цели, не связанные с озеленением, – отсутствует. Проведение акций по посадке деревьев – это, практически, единственная возможность на сегодняшний момент озеленить город, однако, отсутствие финансирования работ по уходу за зелеными насаждениями (особенно ограниченного и специального пользования) приводит к низкой приживаемости саженцев (процент приживаемости существенно ниже нормативного для Севастополя) [8].

К сожалению, в настоящее время в городе не ведется учет зеленых насаждений и отсутствует их реестр по видовому составу и возрасту [7, 8]. Таким образом, не представляется возможным получение достоверных данных о количественных и качественных характеристиках зеленых насаждений Севастополя; нет информационной базы для организации рационального использования озелененных территорий; не несется ответственности за сохранность насаждений предприятиями, организациями и учреждениями.

Заключение. Рассмотрено современное состояние и ретроспективный анализ земель лесного фонда Севастопольского региона за последние 15 лет.

В последние годы прослеживается четкая тенденция сокращения площадей и количества зеленых насаждений г. Севастополя. Анализ лесных площадей в административных границах Севастополя показал значительное уменьшение площадей земель лесного фонда г. Севастополя с 37,6 тыс. га в 2005 г. до 34,4 тыс. га в 2015 г.

Отмечается тенденция уменьшения площадей леса с 2001 к 2015 г. в основном за счет вырубки и лесных пожаров. Примечательно, что уменьшение лесов коснулось в большей части хвойных пород леса, чем лиственных. Анализируя динамику лесоразведения и создания защитных лесонасаждений с 2001 по 2012 гг., однонаправленного тренда отмечено не было.

В связи с тем, что в Севастополе не ведется учет зеленых насаждений и отсутствует их реестр по видовому составу и возрасту, не представляется возможным получение достоверных данных о количественных и качественных характеристиках зеленых насаждений Севастополя.

Основными недостатками в области лесопользования в Севастопольском регионе являются: проведение не в полном объеме мероприятий по повышению производительности лесов, несвоевременные вырубки горельников, повреждение подроста в лесах, самовольные рубки, усушка древостоя, поражение деревьев болезнями и вредителями растений, пожарами, засорение леса отходами, что в конечном итоге приводит к ослаблению биологических и защитных функций леса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каширина Е.С., Голубева Е.И.* Природопользование на особо-охраняемых природных территориях Крымского полуострова // Известия РАН. Серия географическая, 2016. № 5. С. 91–97.

2. *Котляков В.М., Тишков А.А.* Стратегия устойчивого развития России в начале 21 века: инновационные векторы и место географического прогноза // Инновации. № 9. 2009. С. 74–81.

3. *Реймерс Н.Ф., Штильмарк Ф.Р.* Особо охраняемые природные территории. М.: Мысль, 1978. 298 с.

4. *Тарасюк А.Н.* Проблемы сохранения и развития природно-заповедного фонда Севастопольского региона // Записки общества геоэкологов. Симферополь. 2001. Вып. 5–6. С. 53–63.

5. *Тишков А.А.* Охраняемые природные территории и формирование каркаса устойчивости // Оценка качества окружающей среды и экологическое картографирование. М.: ИГРАН, 1995. С. 94–107.

6. *Тишков А.А.* Биосферные функции и экосистемные услуги ландшафтов степной зоны России // Аридные экосистемы. 2010. Т. 16. № 41. С. 5–15.

7. *Доклад* о состоянии и охране окружающей среды города федерального значения Севастополя в 2014 году // Главное управление природных ресурсов и экологии города Севастополя (Севприроднадзор). 40 с.

8. *Доклад* о состоянии и охране окружающей среды города федерального значения Севастополя в 2015 году // Главное управление природных ресурсов и экологии города Севастополя (Севприроднадзор). 147 с.

9. *Экологический* паспорт г. Севастополя за 2005 год. Севастополь // Государственное управление экологии и природных ресурсов Севастополя. 90 с.

10. *Экологический* паспорт г. Севастополя за 2006 год. Севастополь // Государственное управление экологии и природных ресурсов Севастополя. 93 с.

11. *Экологический* паспорт г. Севастополя за 2007 год. Севастополь // Государственное управление экологии и природных ресурсов Севастополя. 98 с.

12. *Экологический* паспорт г. Севастополя за 2008 год. Севастополь // Государственное управление экологии и природных ресурсов Севастополя. 108 с.

13. *Экологический* паспорт г. Севастополя за 2009 год. Севастополь // Государственное управление экологии и природных ресурсов Севастополя. 112 с.

14. *Экологический* паспорт г. Севастополя за 2010 год. Севастополь // Государственное управление экологии и природных ресурсов Севастополя. 103 с.

15. *Экологический* паспорт г. Севастополя за 2011 год. Севастополь // Государственное управление экологии и природных ресурсов Севастополя. 109 с.

16. *Проект* генерального плана г. Севастополя 2017 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа http://xn--80aaelcrp9bdcqcnw.xn--p1ai/genplan (дата обращения: 26.08.2016).

MODERN STATE AND RETROSPECTIVE ANALYSIS OF THE FORESTRY FUND OF THE SEVASTOPOL REGION

S.I. Rubtsova

Institute of Natural and Technical Systems, Russian Federation, Sevastopol, Lenin St., 28

Analysis of wooded areas in the administrative boundaries of Sevastopol showed a significant decrease in the forested area of Sevastopol from 37.6 thousand hectares in 2005 to 34, 4 thousand hectares in 2015. In recent years there has been a clear tendency of reduction of areas and number of green spaces in Sevastopol. The main shortcomings in the field of forest management in Sevastopol region have been identified.
Keywords: forest fund, forestry, specially protected natural territories, the Crimean peninsula, Sevastopol.

УДК 504.4

РАЗМЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЧАСТИЦ ЧЕРНОМОРСКОГО БУРОВОГО ШЛАМА

М.В. Начева

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: mari.nacheva@mail.ru

В статье представлены результаты исследования размеров бурового шлама Крыма, с помощью 3D сканирующего лазерного рамановского спектрометра. Благодаря данному прибору был изучен фракционный состав бурового шлама.
Ключевые слова: буровой шлам, частицы, загрязнение, экология, экологическая безопасность, спектрометр.

Введение. Добыча нефти и газа является одной из ведущих отраслей народного хозяйства. Доля нефтяных запасов России составляет 10–13% от их мирового объема [1]. Крым также является нефтедобывающим регионом, по данным Министерства энергетики здесь за 2016 год было добыто 1,644 млрд. м^3 природного газа, газового конденсата и нефти 53 тыс. т. Добыча углеводородов сопряжена с образованием большого количества разнообразных отходов: буровые сточные воды, отработанный буровой раствор и буровой шлам.

Буровой шлам является одним из наиболее опасных для окружающей природной среды отходов. В его состав входят более 80 различных химических реагентов и компонентов выбуренной породы, класс опасности которых различен и составляет от II до IV, а водородный показатель pH колеблется от 2 до 12,5 [2]. Основные компоненты бурового шлама их класс опасности и значение водородного показателя (pH) представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные компоненты бурового шлама и их класс опасности для окружающей природной среды (ОПС)

Название компонентов	Назначение и pH	Класс опасности вещества	Фактический класс опасности для ОПС
Стабилизаторы: **КМЦ** – 80/300, 85/400, 85/600, 85/700 **FINFIX HC,LC,** **TYLOZA HV, VHR,** **PAC L, LL** **CELPOL SLX,POLYPAC UL**	Стабилизаторы снижают фильтрацию и изменяют вязкость pH = 7,0–11,0	3	2
Структурообразователи: **Силикат натрия**	Для повышения прочности геля высокоминерализованных полимерных БР.	3	2
Разжижители: **Q-BROKSIN (ФХЛС)**	Разжижитель и стабилизатор систем БР на минерализованной и пресноводной основе. pH = 2,9	4	3

Продолжение табл. 1

Название компонентов	Назначение и pH	Класс опасности вещества	Фактический класс опасности для ОПС
Щелочные реагенты: **-Кальцинированная сода, -Гидроксид кальция**	Для регулирования водородного показателя (pH) pH=12	3	2
Понизитель pH: **Лимонная кислота**	Снижает pH в БР на водной основе, pH=2,2	3	2

Примечание: БР – буровой раствор; КМЦ – карбоксиметилцеллюлоза; FINFIX HC,LC – натриевая соль простого эфира целлюлозы с гликолевой кислотой; PAC L,LL, CELPOL SLX,POLYPAC UL – целлюлозные полимеры; Q – BROXIN = ФХЛС - Феррохромный лигносульфонатный реагент [3].

Целью работы является изучение фракционного состава бурового шлама, как важной характеристики данного отхода, которую необходимо учитывать также, как его состав. Поскольку от размера частиц бурового шлама зависят его физико-химические свойства и, исходя из этого, его влияние на окружающую среду.

Материалы и методы. Для определения размеров частиц, из которых состоит буровой шлам, был взят образец данного отхода из скважины № 26 в интервале бурения 1342–1351 м шельфа Чёрного моря. Образец был исследован с помощью 3D сканирующего лазерного рамановского спектрометра на базе Севастопольского государственного университета. Следует отметить, что исследование фракционного состава частиц шлама Крыма, таким способом, были проведены впервые.

3D сканирующий лазерный рамановский спектрометр Confotec NR500 (далее – Confotec NR500) предназначен для измерения рамановских/люминесцентных спектров в точке, а также записи 2D и 3D изображений различных микрообъектов с пространственным XY разрешением ~0.35 мкм (длина волны лазера 532 нм; объектив 100^x, NA = 0.95). Построение рамановских, рэлеевских или люминесцентных изображений микрообъектов может осуществляться с помощью различных типов сканеров (гальванических зеркал, XY моторизованного столика, Z подвижки).

Confotec NR500 позволяет выполнять следующие измерения:

− проводить спектральные измерения в точке и получать спектральные характеристики различных материалов;

− проводить измерения рамановского сигнала в выбранном диапазоне длин волн в процессе XY (опционально XYZ) сканирования области образца;

− получать оптические изображения объектов. На рис. 1 представлена область рабочей зоны с прибором, где проводились исследования.

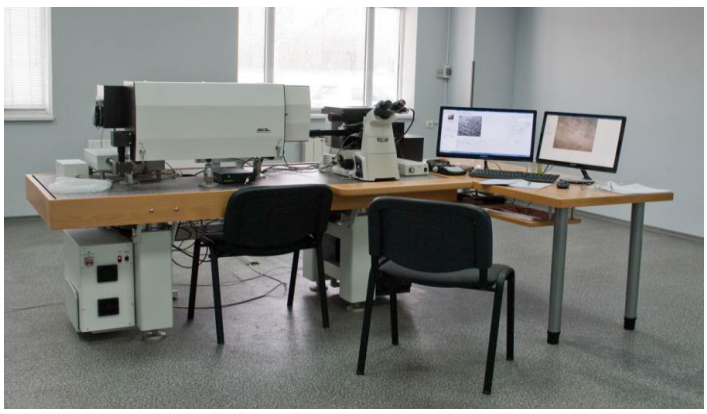


Рис. 1. 3D сканирующий лазерный рамановский спектрометр Confotec NR500

Результаты исследования. На изменение физико-химических свойств частиц выбуренной породы при превращении их в буровой шлам влияет пропитка дисперсионной средой промывочной жидкости. Поры и трещины частиц породы заполняются дисперсионной средой промывочной жидкости, поверхность глинистых частиц модифицируется, на внешней и внутренней поверхности частиц выбуренной породы адсорбируются вещества различной природы из дисперсионной среды промывочной жидкости.

Минералогический состав бурового шлама определяется литологическим составом разбуриваемых пород и может существенно изменяться по мере углубления скважины. Химический состав бурового шлама зависит, как от его минерального состава, так и от свойств промывочной жидкости. Гранулометрический состав бурового шлама определяется типом и диаметром породоразрушающего инструмента, механическими свойствами породы, режимом бурения, свойствами промывочной жидкости и эффективностью ее очистки [3]. В табл. 2 показан фракционный состав бурового шлама, образующегося при добыче газа и газового конденсата на шельфе Чёрного моря, исследованный с помощью лазерного рамановского спектрометра

Таблица 2. Фракционный состав бурового шлама шельфа Чёрного моря

№	Радиус, нм	Диаметр, нм	Площадь поверхности, нм^2
1	3,40	6,79	144,92
2	0,54	1,09	3,71
3	0,68	1,36	5,8
4	1,22	2,45	18,78
5	0,41	0,82	2,09
6	0,54	1,09	3,71
7	0,41	0,82	2,09
8	0,68	1,36	5,8
9	0,41	0,82	2,09
10	0,54	1,09	3,71
11	0,54	1,09	3,71
12	2,04	4,08	52,17
13	2,45	4,89	75,13
14	0,95	1,9	11,36

Как следует из анализа таблицы, фракционный состав бурового шлама изменяется в широких пределах и находится в диапазоне от 0,82 нм и до 6,79 нм, что в среднем составляет 1,92 нм. Абсолютная погрешность измерений составляет ±0,01 нм. Полученные данные необходимы для того, чтобы была возможность очистить буровой раствор от примеси выбуренной породы для его повторного использования. Поступающие в буровой раствор частицы выбуренной породы оказывают вредное влияние на его основные технологические свойства, а, следовательно, и на технико-экономические показатели бурения, поэтому очистке буровых растворов от вредных примесей уделяют особое внимание. Для очистки бурового раствора от шлама используется комплекс различных механических устройств: вибрационные сита, гидроциклонные шламоотделители (песко- и илоотделители), сепараторы, центрифуги. Кроме того, в наиболее неблагоприятных условиях перед очисткой от шлама буровой раствор обрабатывают реагентами - флокулянтами, которые позволяют повысить эффективность работы очистных устройств. Несмотря на то, что система очистки сложная и дорогая, в большинстве случаев применение ее рентабельно. Вследствие значительного увеличения скоростей бурения, сокращения расходов на регулирование свойств бурового раствора, уменьшения степени осложненности ствола, удовлетворения требований защиты окружающей среды. На

рис. 2 представлен снимок образца бурового шлама, полученный с помощью 3D сканирующего лазерного рамановского спектрометра, увеличенный в 40 раз.

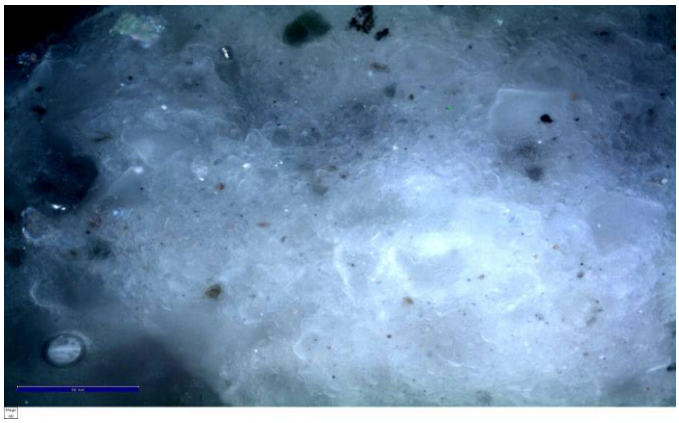


Рис. 2. Образец бурового шлама

Заключение. Результаты исследований показали, что размеры частиц, составляющих черноморский буровой шлам, малы и составляют 0,82 нм и до 6,79 нм. Вследствие этого возникают определенные экологические проблемы.

Во-первых, мелкие частицы трудно удалить из промывочной жидкости средствами механической очистки. При повторном гидротранспорте частиц бурового шлама через скважину они еще больше диспергируются

Во-вторых, с уменьшением размера частиц замедляется скорость их осаждения в водной среде. Следовательно, при сбросе промывочной жидкости или шлама в морскую среду ее мутность сохраняется длительное время.

Таким образом, при оценке экологической безопасности строительства скважин необходимо знать и учитывать не только свойства бурового шлама, но и размер его частиц.

Выражаю благодарность за помощь в проведении исследований сотрудникам лаборатории Молекулярной и клеточной биофизики Севастопольского государственного университета, особо выразив признательность Мосунову А.А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ручкинова О.И., Вайсман Я.И.* Использование твердых отходов нефтедобычи для снижения техногенной нагрузки на природные геосистемы: монография. Перм. гос. техн. ун-т., Пермь, 2004. 285 с.

2. *Начева М.В.* Применение критериев отнесения отходов к классам опасности для окружающей природной среды на примере бурового шлама, образующегося при добыче нефтеуглеводородов на шельфе Чёрного моря // Экологическая безопасность территорий и акваторий: региональные и глобальные проблемы: материалы региональной науч.-практ. конф. (г. Керчь, 24–28 октября 2016 г.). Керчь, 2016. С. 144–148.

3. *Балаба В.И.* Обеспечение экологической безопасности строительства скважин на море // Бурение и нефть. 2004. № 1. С. 18–21.

THE STUDY OF PARTICLE SIZE OF THE BLACK SEA DRILL CUTTINGS USING 3D SCANNING LASER RAMAN SPECTROMETER

M.V. Nacheva

Institute of Natural and Technical Systems, Russian Federation, Sevastopol, Lenin St., 28
E-mail: mari.nacheva@mail.ru

The drill cuttings which occur in a process of oil /gas production at the Black sea shelf is studied in the paper. Using 3d scanning laser Raman spectrometer the particle sizes of drill cuttings were determined. The results of study are of great practical importance for coastal engineering and ecological protection of the Black sea shelf.

Keywords: drill cuttings, particles, pollution, ecology, environmental safety, spectrometer.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

Брюховецкий А.А. 45

Воронин Д.Ю. 50

Воскресенская Е.Н. 89, 109

Вышкваркова Е.В. 95

Гайский В.А. 36

Гайский П.В. 36

Георгиева Е.Ю. 73

Горбунова Т.Л. 115

Гудкова Н.К. 115

Дологлонян А.В. 27

Зима В.В. 19

Канов Л.Н. 59

Коваленко О.Ю. 89

Кондратьев С.И. 19

Краснодубец Л.А. 59

Люльчак Д.С. 19

Мансурова И.М. 73

Мельникова Е.Б. 64

Начева М.В. 129

Рамазин А.Н. 7

Рыбак О.О. 100

Рыбак Е.А. 100

Рубцова С.И. 122

Серебренников А.Н. 64

Скатков А.В. 45, 50

Скатков И.А. 41, 50

Стаценко И.Н. 27

Стельмах Л.В. 73

Стефанович А.А. 109

Сухов А.К. 27

Ткаченко К.С. 41

Федотов А.Б. 83

Финенко З.З. 73

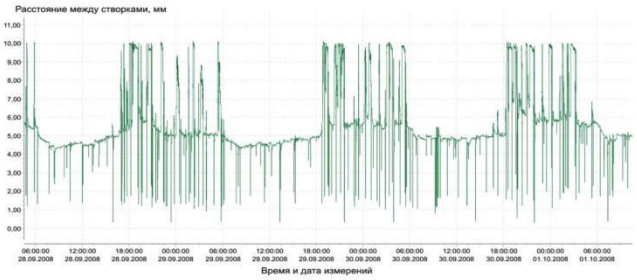
Цилинский В.С. 73

Шишкин Ю.Е. 45

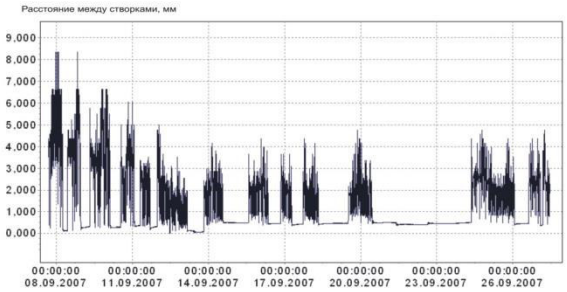
Шутов С.А. 19

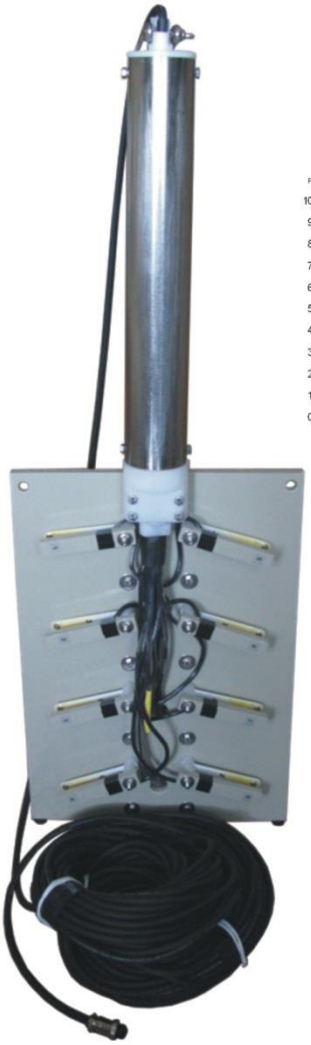
СИСТЕМЫ БИОМОНИТОРИНГА

Стандартная суточная активность черноморской мидии



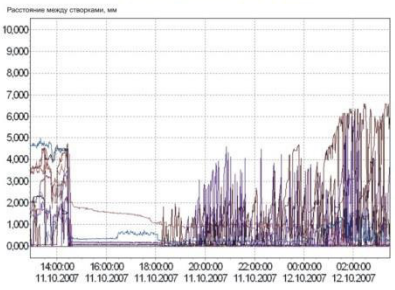
Нарушение суточных циклов при хроническом загрязнении



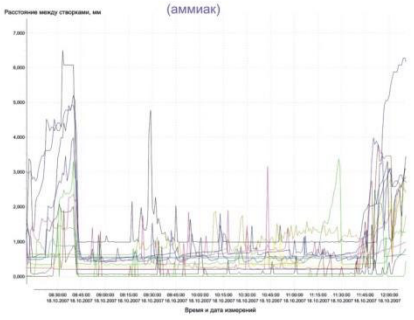


Групповая реакция на острые воздействия токсикантов

(раствор гидрохинона - конц. 1 г/л)



(аммиак)



Технические и метрологические характеристики

Измеряемый параметр	Диапазон измерения	Случайная погрешность	Погрешность
Температура, ^{0}C	-2÷35	±0,005	±0,05
Изменения расстояния между створками мидий, мм	1÷15	±0,01	±0,1

Параметр	Значение
Количество биодатчиков, шт.	16 (стандартно)
Период опроса всех каналов, с	1
Глубина погружения ПМ, м “Биопост” “Биомонитор – Л”	 до 100 до 3
Длина кабеля питания и связи, м	до 100
Первичный интерфейс	RS232 (9600 бод)
Питание внешнее	~100 - 240В 50Гц
Питание электронного блока	8 - 15В 0,5А
Потребляемая мощность	порядка 0,3Вт
Габаритные размеры и вес : “Биопост”	Высота – 0,45 м; Ширина – 0,30 м; Длина – 0,20 м; Вес – 6 кг

Институт природно-технических систем ЦАМИ, г. Севастополь, oaoimhi@inbox.ru

Институт природно-технических систем

Адрес редакции:
Институт природно-технических систем (ИПТС)
299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: skos.sevastopol@inbox.ru
Тел.: +7 (8692) 54-44-10
http://www.ИПТС.рф

Технические редакторы: И.Г. Шмырева, А.Н. Нечесина

Подписано к печати 27.09.2017.
Заказ 68. Тираж 100 экз.

Отпечатано ИК ИПТС
299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
ОГРН 1022302946489 от 24.05.2012
Тел.: +7 (8692) 54-31-46
ecosi@yandex.ru