

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ МОРСКОЙ БУРОЙ ВОДОРОСЛИ *SILVETIA BABINGTONII*

Коженкова С.И.,

Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток

Аннотация. Бурая водоросль *Silvetia babingtonii* распространена вдоль материкового побережья Японского моря от зал. Петра Великого на юге до зал. Чихачева на севере, у западного, южного и восточного побережий о. Сахалин, у южных Курильских островов до о. Уруп и у северных Японских островов. Водоросль растет преимущественно в литорали. Выявлены изменения в обилии и распространении вида в южной части ареала. Уменьшение биомассы *Silvetia babingtonii* в зал. Петра Великого в начале 21 века, по-видимому, связано с подъемом уровня моря и повышением температуры воды и воздуха.

Ключевые слова: *подъем уровня моря, рост температуры, литораль, Японское море.*

INFLUENCE OF CLIMATE CHANGE ON THE DISTRIBUTION OF THE MARINE BROWN ALGAE *SILVETIA BABINGTONII*

Kozhenkova S.I.,

Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok

Abstract. The brown alga *Silvetia babingtonii* grows along the continental coast of the Sea of Japan from Peter the Great Bay in the south to Chikhachev Bay in the north, as well as along the western, southern and eastern coasts of Sakhalin Island, on the southern Kuril Islands to Urup Island and on the northern Japanese Islands. The alga is littoral species. Changes in the biomass and distribution of the species in the southern part of its range have been revealed. At the beginning of the 21st century, biomass of *Silvetia babingtonii* in Peter the Great Bay decreased, probably due to sea level rise and increasing of water and air temperature.

Keywords: *sea level rise, temperature increase, intertidal zone, Sea of Japan.*

Введение. Бурая водоросль *Silvetia babingtonii* (Harvey) E.A. Serrão, T.O.Cho, S.M. Woo et Brawley (syn. *Pelvetia wrightii* Okamura) – сальвеция Бабингтона - относится к семейству Fucaceae (порядок Fucales) и является многолетним видом. Растения имеют кустистый, плотный таллом высотой 10-20 (25) см от оливкового до темно-бурого цвета. К грунту водоросли прикрепляются конусовидной подошвой, имеют цилиндрический короткий стволик и дихотомически ветвящиеся ветви 3-6 мм шириной. Вид произрастает в Японском и Охотском морях, а также у берегов Курильских островов, о. Хоккайдо и в северной части о. Хонсю [17]. Формируя пояс растительности в литорали, сальвеция выполняет важные средообразующую и продукционную функции в прибрежных морских сообществах.

Талломы *S. babingtonii* содержат комплекс биологически активных веществ, состоящих из органических и минеральных соединений. Органические вещества включают углеводы, белки, витамины, пигменты, липиды. Содержание альгиновой кислоты составляет 22-28% массы сухого вещества, фукоидана 16-18%, маннита 6.5-11.6% [18, 27]. Фукостерол – липид, обладающий противораковыми, антиоксидантными и противодиабетическими свойствами, содержится в водоросли в довольно высокой концентрации [28]. Вид перспективен в качестве сырья для производства фармацевтических препаратов и может использоваться как пищевой продукт.

Согласно историческим данным, в начале и середине XX в. на литорали российского побережья Японского моря *S. babingtonii* формировала самостоятельный пояс растительности на скалистых и валунных участках [2, 6, 21]. Наблюдения за составом и структурой

растительных сообществ в зал. Петра Великого Японского моря в начале XXI столетия показали, что в ряде районов обилие водоросли заметно уменьшилось. В связи с этим является актуальным анализ временной изменчивости распространения *S. babingtonii* в пределах ее ареала.

Материалы и методы. Сведения о распространении и обилии *S. babingtonii* получены на основе литературных данных (более 50 публикаций) и авторских материалов. Выделено два периода: 1) XX столетие и 2) начало XXI столетия.

Данные автора получены в 2000-2018 гг. в ходе изучения макрофитобентоса литорали и сублиторали в зал. Петра Великого и в б. Киевка Японского моря, а также при проведении мониторинга загрязнения морских прибрежных вод тяжелыми металлами с использованием водорослей в 1997-2020 гг. вдоль побережья Приморского края [3, 8-12, 20, 24 и др.]. Значения биомассы *S. babingtonii* определены на основе количественных гидробиологических проб.

Результаты и обсуждение. Сильвеция Бабингтона распространена вдоль материкового побережья Японского моря от зал. Петра Великого на юге до зал. Чихачева на севере, у западного, южного и восточного побережий о. Сахалин, у южных Курильских островов до о. Уруп и у северных Японских островов. Водоросль растет преимущественно в литорали, но в некоторых районах отмечена и в верхней сублиторали до глубины 1.5-2 м, на скалистом и каменистом грунте у открытых и полузащищенных участков побережья. Биомасса вида изменяется в широком диапазоне – от 0.1 до 20 кг/м² [14, 18].

Сильвеция образует самостоятельные или смешанные с другими видами водорослей донные сообщества. В зал. Петра Великого в поясе этой бурой водоросли массово развиваются усоногие раки *Chthamalus dalli* Pilsbry, 1916, брюхоногие моллюски *Littorina sitkana* R. A. Philippi и *Falsicingula mundana* (Yokoyama, 1926), двустворчатые моллюски *Turtonia minuta* (O. Fabricius, 1780); полихеты *Neodexiospira alveolata* (Zachs, 1933) [5].

Видовой состав сообществ скалистых грунтов с доминированием *S. babingtonii* в более северных районах постепенно изменяется за счет возрастающего участия бурой водоросли *Fucus distichus* subsp. *evanescens* (C. Agardh) H.T. Powell. В б. Киевка в верхней литорали в сообществе *S. babingtonii* + *Ch. dalli* фитомасса преобладает над биомассой зообентоса. Количественные показатели доминирующих видов следующие: *S. babingtonii* – биомасса 500 г/м², проективное покрытие 3%; *C. dalli* – 300 г/м² и 5400 экз./м². Наибольшая биомасса сообщества – 1750 г/м² – отмечена весной и вызвана массовым развитием бурой водоросли *Scytosiphon lomentaria* (Lyngbye) Link (573 г/м², 33%). В августе основным сопутствующим видом является зеленая водоросль *Chaetomorpha moniligera* Kjelman (65 г/м², 1%). В зообентосе многочисленны *N. alveolata* (6 г/м², 20000 экз./м²), брюхоногие моллюски *Littorina brevicula* (Philippi, 1844) (26 г/м², 200 экз./м²) и *L. sitkana* (50 г/м², 800 экз./м²). В нижней литорали на скалистых грунтах в б. Киевка сформировано сообщество *S. babingtonii* + *F. distichus* + *Corallina pilulifera* Postels et Ruprech. Доминирующие виды являются многолетними, их средние количественные характеристики следующие: *S. babingtonii* – 2100 г/м² и 12%, *F. distichus* – 1748 г/м² и 10%, *C. pilulifera* – 210 г/м² и 10%. Основным сопутствующим видом является *Neorhodomela aculeata* (Perestenko) Masuda, часто встречаются *Sargassum miyabei* Yendo и *Ulva lactuca* Linnaeus. Зообентос в сообществе представлен в основном *L. sitkana* (3600 экз./м²), *L. brevicula* (140 экз./м²), *Littorina squalida* (Broderip & G.V. Sowerby I, 1829) (18 экз./м²), *Lottia versicolor* (Moskalev, 1967) (100 экз./м²) и *Falsicingula athera* Bartsch, 1967 (2700 экз./м²), его биомасса составляет 5-11% от общей биомассы [3, 24].

В Татарском проливе в зал. Чихачева на валунно-каменистом грунте в защищенных местообитаниях пояс сильвеции имеет биомассу до 7038 г/м². Сопутствующими видами являются бурые водоросли *Analipus japonicus* (Harvey) M.J. Wynne, *Chorda asiatica* Sasaki & Kawai, *Chordaria flagelliformis* (Müller) C. Agardh и *S. lomentaria*. На более открытых участках побережья на скалистых платформах отмечено пышное развитие *S. babingtonii* (5663.4 г/м²) совместно с *F. distichus* (3623,4 г/м²) [21]. Биомасса животных невелика (115.2 г/м²), однако численность достигает 40 000 экз./м², наиболее массовыми являются *F. athera* и *L. sitkana* [16].

На западном побережье о. Сахалин сообщества скалистой полузащищенной литорали имеют большое сходство с литоралью материкового берега Татарского прол. и представлены поясом сальвеции и фукуса. Проективное покрытие *S. babingtonii* достигает 60-80%, биомасса 2630 – 3330 г/м² [22].

Произрастание *S. babingtonii* севернее о. Уруп Курильских островов не отмечено. На южных Курилах и северных Японских островах вид встречается как на тихоокеанском побережье, так и со стороны Японского и Охотского морей. Так, на о. Кунашир биомасса *S. babingtonii* в литорали может достигать 25 кг/м² [19]. На о. Итуруп сальвеция встречается совместно с фукусом – смешанно или отдельной полосой выше фукуса на камнях и скалах. Биомасса *S. babingtonii* составляет менее 100 г/м², в то время как биомасса фукуса достигает 4510 г/м² и более, и становится еще более значительной (15800-20280 г/м²) на более северных островах Уруп и Симушир [15].

В южной части ареала в начале XXI в., по сравнению с XX столетием, обилие и частота встречаемости *S. babingtonii* уменьшились. Например, на о. Путягина в 1952 г. сальвеция формировала пояс растительности в литорали вдоль всего острова на скалистых участках, защищенных от прямого удара волн [23]. В 1984 г. биомасса сообщества с доминированием *S. babingtonii* в среднем составляла 3929.9 г/м², при этом на долю доминанта приходилось 96% [7]. В 2004 г. вид не был обнаружен на скалистых участках литорали острова.

В зал. Восток, одном из наиболее изученных в биологическом отношении районов зал. Петра Великого Японского моря, в 1970-1980-е гг. *S. babingtonii* отмечали на многих участках скалистой и валунной литорали. Осенью 1990 г. биомасса бентоса в поясе сальвеции в бухтах Средняя и Гайдамак в среднем достигала 7471.7 г/м². В 1994–1995 гг. данный вид присутствовал в зал. Восток уже в небольшом количестве. В начале 2000-х гг. было найдено лишь несколько экземпляров *S. babingtonii* в районе м. Пашинникова и в б. Гайдамак [9]. В 2021 г. на литорали зал. Восток вид не был обнаружен [13]. Уменьшение обилия и частоты встречаемости вида отмечено и в других частях зал. Петра Великого. В ряде местообитаний, где в XX в. был развит пояс растительности с доминированием *S. babingtonii* и биомассой до 7400 – 9000 г/м², теперь сальвеция больше не произрастает, а там, где еще встречается, представлена единичными экземплярами с биомассой менее 200 г/м². В других частях ареала *S. babingtonii* по-прежнему формирует растительные сообщества в литорали (биомасса вида 500 - 2100 г/м² и более) и выполняет важные средообразующие и продукционные функции.

Из-за своего расположения на границе контакта суши и океана, прибрежные зоны являются наиболее уязвимыми к воздействию климатических изменений. По прогнозным оценкам изменение климата повлияет на температуру воды и воздуха, океанические течения, частоту и интенсивность штормов, количество атмосферных осадков и скорость повышения уровня моря в разных географических зонах [26]. В период с 1950 по 2014 гг. температура поверхности моря повышалась примерно на 0.1 °С за десятилетие. В результате уменьшения объема полярного льда и теплового расширения океана происходит повышение уровня моря. За период с 1901 по 2010 гг. уровень океана в среднем увеличился на 0.19 м. По современным оценкам, повышение уровня моря идет со скоростью более 3 мм/год, таким образом за последние 30 лет он поднялся почти на 10 см, а к 2100 г. поднимется еще на 40-75 см [4]. В Японском, Желтом и Восточно-Китайском морях изменение уровня моря соответствует глобальным оценкам.

Повышение уровня моря может привести к затоплению обширных прибрежных территорий. Высота приливно-отливной зоны вдоль побережий, где произрастает *S. babingtonii*, не одинакова: в зал. Петра Великого она составляет 0.5 (0.7) м, а у северной границы ареала в Татарском прол. достигает 1.5-2.5 м. Как известно, в литорали растения и животные располагаются по вертикали ясно выраженными ярусами, которые используются исследователями для выделения и описания сообществ. Наиболее резкая смена ярусов наблюдается на отвесных скалах, где полоса обитания тех или иных организмов может быть ограничена лишь несколькими сантиметрами по вертикали [21]. Соответственно, чем ближе береговая линия, тем шире различные ярусы в литорали. В зал. Петра Великого повышение

уровня моря даже на 10 см может привести к замещению нижнего этажа верхнего горизонта литорали, в котором чаще всего и отмечали произрастание *S. babingtonii* в этой части ареала в XX столетии [17], на верхний этаж нижнего горизонта литорали с характерным доминированием красной известковой водоросли *C. pilulifera*.

Изменение температуры воды и воздуха вследствие потепления климата также может оказывать влияние на распространение видов в прибрежной зоне моря. В российской части Японского моря в последние десятилетия отмечена тенденция к повышению температуры воды и воздуха. Так, в Татарском проливе рост температуры воды составил 0.11-0.16 °C / 10 лет, воздуха 0.20 °C / 10 лет [1]. Во Владивостоке в период с 1960 по 2020 гг. средняя годовая температура воздуха увеличилась примерно на 2 °C. Исследования о влиянии температуры воды и воздуха на выживаемость гамет и проростков *S. babingtonii* не проводились, но учитывая данные о негативном влиянии повышенных температур на популяцию близкородственного вида *Silvetia siliquosa* (С.К. Tseng & С. F. Chang) Е. А. Serrão, Т. О. Cho, S. M. Boo & S. H. Brawley, растущего у берегов Кореи и Китая [25], можно предполагать, что положительное изменение термических характеристик среды обитания исследуемого вида наряду с повышением уровня моря стало причиной уменьшения обилия и распространения *S. babingtonii* в зал. Петра Великого Японского моря в последние десятилетия.

Выводы.

Формируя пояс растительности в литорали, бурая водоросль *S. babingtonii* выполняет важные средообразующую и продукционную функции в прибрежных морских сообществах. Климатические изменения, проявляющиеся через подъем уровня моря и рост температуры морской воды и воздуха, приводят к изменениям в сообществах литорали северо-западной части Японского моря. По сравнению с началом и серединой XX столетия, когда *S. babingtonii* была обычным видом в зал. Петра Великого и формировала сообщества на скалистых участках литорали, в конце XX и начале XXI вв. вид стал редким в этой части ареала, его биомасса не превышает 200 г/м². В более северных районах *S. babingtonii* по-прежнему является доминантом литоральных сообществ, биомасса вида составляет 500 - 2100 г/м² и более.

Литература

1. Гайко Л.А. Изменчивость температуры воды и воздуха вдоль побережья восточного Приморья и Хабаровского края по данным наблюдений на гидрометеорологических станциях // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38. № 4. С. 389–404.
2. Гайл Г.И. Очерк водорослевого пояса Приморского побережья в связи с некоторыми общими вопросами его использования // Изв. Тихоок. науч. ин-та рыбн. хоз-ва. 1930. Т. 4. Вып. 2. 46 с.
3. Галышева Ю.А., Коженкова С.И. Макробентос бухты Киевка и условия его существования. Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2023. 180 с.
4. Гулев С.К. Глобальные изменения климата и мировой океан // Проблемы прогнозирования. 2023. № 6. С. 25–36.
5. Гульбин В.В., Иванова М.Б., Кепель А.А. Поясообразующие группировки островной литорали Дальневосточного государственного морского заповедника // Исследования литорали Дальневосточного морского заповедника и сопредельных районов. Владивосток: ДВО АН СССР, 1987. С. 83–111.
6. Зинова Е.С. Водоросли Японского моря (бурые) // Изв. Тихоокеан. науч.-пром. станции. 1929. Т. 3. 63 с.
7. Иванова М.Б., Цурпало А.П. Состав и распределение сообществ макробентоса на литорали острова Путятина (залив Петра Великого, Японское море) // Известия ТИНРО. 2013. Т. 172. С. 149–160.
8. Коженкова С.И. Макрофиты залива Находка Японского моря // Ботанический журнал. 2009. № 5. С. 643–655.

9. Коженкова С.И. Ретроспективный анализ морской флоры залива Восток Японского моря // Биология моря. 2008. Т. 34. № 3. С. 159–174.
10. Коженкова С.И., Христофорова Н.К., Чернова Е.Н. Долговременный мониторинг загрязнения морских вод северного Приморья тяжелыми металлами с помощью бурых водорослей // Экология. 2000. №3. С. 233–237.
11. Коженкова С.И., Христофорова Н.К., Чернова Е.Н., Кобзарь А.Д. Долговременный биомониторинг загрязнения Уссурийского залива Японского моря тяжелыми металлами // Биология моря. 2021. Т. 47. № 4. С. 235–243.
12. Коженкова С.И., Чернова Е.Н., Шулькин В.М. Микроэлементный состав зеленой водоросли *Ulva fenestrata* из залива Петра Великого Японского моря // Биология моря. 2006. Т. 32. № 5. С. 346–352.
13. Костина Е.Е., Цурпало А.П., Кепель А.А. Сравнение литоральных сообществ макробентоса на некоторых участках залива Восток Японского моря по материалам 1990 и 2021 годов // Морская биология в 21 веке: систематика, генетика, экология морских организмов. Тез. докл. Владивосток, 2022. С. 179 – 181.
14. Кусакин О.Г., Иванова М.Б., Цурпало А.П. Список видов животных, растений и грибов литорали дальневосточных морей России. Владивосток: Дальнаука, 1997. 168 с.
15. Кусакин О.Г., Кудряшов В.А., Тараканова Т.Ф., Шорников Е.И. Поясообразующие флоро-фаунистические группировки литорали Курильских островов // Растительный и животный мир литорали Курильских островов. Новосибирск: Наука, 1974. С. 5–75.
16. Мокиевский О.Б. Фауна литорали северо-западного побережья Японского моря // Труды ин-та Океанологии АН СССР. 1960. Т. 34. С. 242–328.
17. Перестенко Л.П. Водоросли залива Петра Великого. Л.: Наука, 1980. 232 с.
18. Суховеева М.В., Подкорытова А.В. Промысловые водоросли и травы морей Дальнего Востока: биология, распространение, запасы, технология переработки. Владивосток: ТИПРО-центр, 2006. 243 с.
19. Цурпало А.П., Костина Е.Е. Литоральная биота острова Кунашир (Курильские острова) // VIII Дальневосточная конференция по заповедному делу. Матер. конф. Т. 2. Благовещенск: АФ БСИ ДВО РАН, БГПУ, 2007. С. 66–70.
20. Чернова Е.Н., Коженкова С.И. Определение пороговых концентраций металлов в водорослях-индикаторах прибрежных вод северо-западной части Японского моря // Океанология. 2016. Т. 56. № 3. С. 393–402.
21. Щапова Т.Ф. Литоральная флора материкового побережья Японского моря // Тр. Ин-та Океанологии АН СССР. 1957. Т. 23. С. 21–66.
22. Щапова Т.Ф., Возжинская В.Б. Водоросли литорали западного побережья Сахалина // Тр. Ин-та Океанологии АН СССР. 1960. Т. 34. С. 123–146.
23. Щапова Т.Ф., Мокиевский О.Б., Пастернак Ф.А. Флора и фауна прибрежных зон острова Путятина (Японское море) // Тр. Ин-та Океанологии АН СССР. 1957. Т. 23. С. 67–101.
24. Kozhenkova S.I. Checklist of marine benthic algae from the Russian continental coast of the Sea of Japan // Phytotaxa 2020 437 (4): 177–205.
25. Liang Y., Zhang J., Song X. et al. Low genetic diversity in the endangered marine alga *Silvetia siliquosa* (Ochrophyta: Fucaceae) and the implication to conservation // Journal of Oceanology and Limnology. 2022. Vol. 40. P. 216–225.
26. McInnes K.L., Nicholls R.J., van de Wal R. et al. Perspective on regional sea-level change and coastal impacts // Cambridge Prisms: Coastal Futures. 2024. Vol. 2. P. 1–13.
27. Skriptsova A.V., Shevchenko N.M., Tarbeeva D.V., Zvyagintseva T.N. Comparative study of polysaccharides from reproductive and sterile tissues of five brown seaweeds // Mar. Biotechnol. 2012. Vol. 14. P. 304–311.
28. Terasaki M., Hirose A., Narayan B. et al. Evaluation of recoverable functional lipid components of several brown seaweeds (Phaeophyta) from Japan with special reference to fucoxanthin and fucosterol contents // J. Phycol. 2009. Vol. 45. P. 974–980.