

УДК 57.032

**ВЛАГОУДЕРЖИВАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ БУРОЙ ВОДОРОСЛИ
*SACCHARINA BONGARDIANA***

Т.Н. Королёва (КамчатГТУ)

*Представлены результаты проведенного эксперимента по изменению содержания влаги через определенные промежутки времени в тканях различных частей разновозрастных представителей *Saccharina bongardiana* в разные сезоны года.*

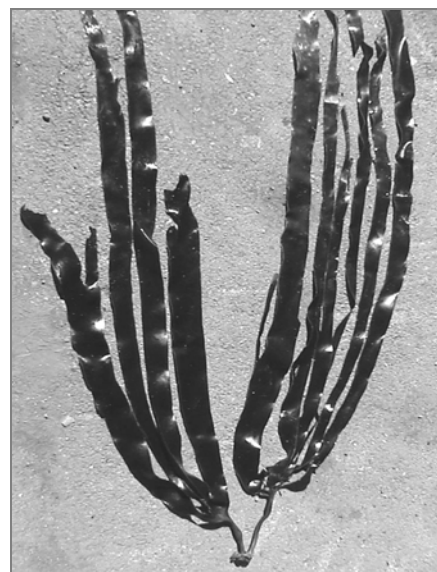
*Change of moisture content in fabrics of various parts of uneven-age representatives *Saccharina bongardiana* in different periods of time are presented.*

У восточного побережья Камчатки бурая водоросль *Saccharina bongardiana* является одним из массовых видов ламинариевых водорослей (рис. 1). В настоящее время промысел этого вида ведется у юго-восточных берегов Камчатки, Северо-Курильских и Командорских островов. Для правильного определения направлений рационального использования и для оценки технологических параметров сырья, собранного в разные периоды развития *S. bongardiana*, необходима информация по влагоудерживающей способности ее тканей. Для этого нужны данные по содержанию воды и сухого вещества в ламинарии, а также понимание того, как изменяются их количество и соотношение во времени и пространстве.

Прежде чем говорить о способности тканей удерживать влагу, необходимо разобраться в характерных особенностях клеток, которые составляют ткани ламинариевых водорослей. Основным компонентом этих клеток является вода, на долю которой может приходиться до 90% сырой массы. Она является средой и субстратом для биохимических реакций. Благодаря высокой подвижности молекул воды в слоевище поступают и переносятся растворенные питательные вещества и газы [1]. В состав пластических веществ ламинариевых водорослей входят органические и минеральные компоненты, растворенные или связанные с водой. От содержания внутриклеточных элементов питания зависят состояние и удельная скорость роста водорослей [2]. Поэтому количество сухого вещества в тканях является одним из наилучших показателей зрелости растений и их физиологического состояния.



а



б

Рис. 1. Бурая водоросль *Saccharina bongardiana*: а – фрагмент зарослей во время отлива у восточного побережья Камчатки; б – внешний вид взрослого растения

В растительных клетках вода, как и другие элементы питания, может находиться в свободном и связанном состоянии. Из общего ее количества на свободную часть, являющуюся наиболее подвижной фракцией, приходится 85–90%, а на связанную, менее подвижную – 10...15%. Свободная вода связана с полисахаридами, органическими кислотами и другими растворенными в ней веществами, а связанная взаимодействует с биополимерами и влияет на их свойства [1].

Сухое вещество ламинариевых по своему составу отличается от сухого вещества наземных растений более высоким содержанием минеральных солей. Они необходимы для поддержания клеточного и тканевого осмотического давления и образования буферных систем организма. Кроме того, они служат переносчиками электронов в окислительно-восстановительных реакциях и входят в состав важных органических соединений.

Органические вещества включают в себя комплекс углеводов, азотсодержащие вещества, липиды, витамины и др. Основная доля в органических веществах ламинариевых приходится на углеводы, большую часть из которых составляют полисахариды (до 55% от сухого вещества) [3]. Специфическим полисахаридом бурых водорослей, относящимся к структурным углеводам, является альгиновая кислота. Ее содержание может достигать 40% [4, 5 и др.]. У некоторых представителей рода *Laminaria* ее количество превышает 50% от сухой массы [3].

Полимерные цепи альгиновой кислоты состоят из полиманнуроновых (ММ-) и полигулуриновых (GG-) блоков, в которые могут быть включены чередующиеся остатки D-маннуроновой и L-гулуриновой кислот (МG-участки). Предполагается, что различия в мономерном составе альгинатов связаны с функцией тканей и обеспечивают гибкость, эластичность или жесткость пластины, прочность органов прикрепления. Наибольшей гибкостью отличаются участки слоевища, в которых преобладают альгинаты, обогащенные ММ-блоками и гетерогенными участками (МG-). Жесткость тканям придают клетки, содержащие альгинаты, в которых преобладают GG-блоки [6].

Кроме полисахаридов в состав органических веществ ламинариевых водорослей входит шестиатомный спирт – маннит. Он является обязательным продуктом фотосинтеза и играет роль запасного вещества. Синтезированный маннит легко проходит через мембраны и оказывается в цитоплазме, где может накапливаться в вакуолях или транспортироваться по слоевищу к зонам потребления. В период максимальной фотосинтетической активности его содержание у представителей рода *Laminaria* может достигать 28% от массы сухого вещества [3, 7].

Количество воды, минеральных и органических веществ в тканях ламинариевых водорослей зависит от района произрастания, экологических условий, видовой принадлежности и физиологического состояния растений. Кроме этого, содержание воды и сухого вещества изменяется как во времени, так и в пространстве (в пределах одного слоевища). Например, у культивируемой *L. japonica* количество воды в тканях с апреля по июль уменьшается от 83,5 до 80,5%, а в августе увеличивается до 81,5%. В это же время содержание сухого вещества у нее сначала возрастает от

16,5 до 19,5%, а затем снижается до 18,5% [8]. У природной популяции того же вида по мере роста пластины обводненность тканей увеличивается и процентное содержание сухого вещества снижается. Наибольшее количество воды отмечается в тканях срединной зоны пластины, а сухого вещества – в краевых зонах [9].

По мере роста ламинарии японской количество органических веществ в пластине становится больше, чем минеральных. При замедлении и прекращении этих процессов органических веществ, напротив, становится меньше, а минеральных больше [9]. По данным Н.М. Аминой [6], у культивируемой в Приморье *L. japonica* изменения в содержании минеральных и органических веществ зависят как от условий произрастания, так и от сезонов года. В зимне-весенний период доля минеральных веществ у ламинарии постепенно увеличивается, а органических уменьшается. В летне-осенний период содержание минеральных веществ у нее понижается, а органических возрастает. Максимальное содержание альгиновой кислоты приходится на август – сентябрь и составляет 30–37%, а содержание маннита – на август – октябрь и составляет 15–17% [10]. Сезонная изменчивость проявляется и в качественном преобразовании мономерного состава альгиновой кислоты. Например, с апреля по август отношение маннуриновой кислоты к гулуриновой у культивируемой *L. japonica* уменьшается от 3,47 до 0,92 [8].

Сезонные изменения химического состава ламинарии японской характерны, кроме того, и для отдельных частей слоевища. При этом для пластинчатой части отмечается большая вариабельность, для черешковой – стабильность. Мономерный состав альгиновой кислоты меняется в зависимости от части слоевища. Так, например, гулуриновой кислоты больше в альгинатах ризоидов, чем в альгинатах пластины [10].

Интересно отметить, что у представителей этого вида наибольшее количество углеводов содержится в прекративших рост тканях, так как именно в месте их расположения отмечается наиболее высокий уровень фотосинтеза. При этом в пластинчатой части слоевища количество маннита по направлению к краям снижается. Содержание альгинатов с возрастом увеличивается даже в разрушающейся части пластины. В краевой зоне их количество выше по сравнению с базальной. В поперечном направлении минимальные значения соотношения маннуриновой и гулуриновой кислот характерны также для краевых зон. От соотношения данных кислот во многом зависит прочность гелей, образованных альгинатами, поэтому по изменению этого показателя можно судить об адаптации растений к механическому волновому воздействию [9].

Химический состав ламинарий, как уже отмечалось, сильно изменяется в зависимости от видовой принадлежности. Так, у островов Малой Курильской гряды с июля по сентябрь общий химический состав слоевищ у представителей разных видов рода *Laminaria* был разным. У *L. cichorioides* содержание воды колебалось от 77,9 до 83,9%, сухого вещества – от 16,1 до 22,1%; у *L. japonica* – соответственно от 83,3 до 88,5% и от 11,5 до 16,7%; у *L. angustata* – от 85,5 до 87,8% и от 12,2 до 14,5% [11]. Эти же авторы показали, что содержание альгинатов и маннита тоже изменяется от вида к виду. В целом в изученных ими ламинариях содержание маннита к лету возрастает и достигает 18%, а затем до начала спороношения остается практически постоянным. Количество альгинатов у них колеблется от минимального содержания у *L. japonica* (22,2%) до максимального у *L. angustata* (29,2%) [11].

До начала наших исследований было известно, что у камчатских ламинариевых водорослей содержание воды изменяется от вида к виду и составляет 79–88%. На долю сухого вещества приходится 12–21% [3]. Судя по нашим данным, из распространенных здесь видов ламинариевых водорослей наибольшим средним содержанием воды в пластине в летний период характеризуется *S. bongardiana* (88%), а наименьшим *L. longipes* (76%). У *S. dentigera* она составляет 80%, у *L. yezoensis* – 85% [12]. Максимальное накопление сухого вещества наблюдается у *L. longipes* (24 мг/г). Она отличается от других видов тем, что не сбрасывает старых прошлогодних участков пластины – они сохраняются как разновозрастные части общей пластины. Вероятно, этим обстоятельством можно объяснить максимальное по сравнению с остальными видами накопление у нее ассимилированных веществ. Следующей по количественному содержанию сухих веществ в пластинчатой части слоевища является *S. dentigera* (20 мг/г). По сравнению с другими видами она имеет наиболее толстую пластину и самую большую продолжительность жизни – предположительно 5 лет и более. Содержание сухих веществ у *L. yezoensis* и *S. bongardiana* в это время достигает соответственно только 15 и 12 мг/г [12, 13].

Содержание маннита в ламинариях, произрастающих у камчатского побережья, составляет около 20% от сухой массы, а количество альгиновых кислот – от 15 до 40% [3]. Кроме того,

у них, как и у других ламинарий, наблюдаются количественные изменения в химическом составе в пределах одного слоевища. Например, у *L. longipes* содержание альгинатов в пластине составляет 27% от сухой массы, а в черешке – 23,7%, у *S. bongardiana* соответственно 28,7% и 29,8%, у *S. dentigera* – 26,8 и 23,2% [14].

Стратегия сезонного изменения содержания воды в пластинах *S. bongardiana* в разных экологических условиях, судя по нашим данным [15–18 и др.], имеет свои особенности. Общей стратегией развития растений является сильная обводненность тканей пластин в периоды наиболее интенсивного роста, так как именно в это время активно расходуются пластические вещества. Большую часть вегетации двухлетние растения обводнены сильнее, чем однолетние, и максимальное содержание воды у представителей этих возрастных групп приходится на весенне-летнее время. Это можно объяснить как тем, что после периода низкой фотосинтетической активности в пластинах сохраняется небольшой запас ассимилятов, так и тем, что скорость линейного роста пластин в весенне-летний период по сравнению с осенним значительно больше.

Наши исследования показывают, что различные части пластин *S. bongardiana* содержат разное количество сухого вещества. Вдоль пластины разным образом меняются плотность, толщина и удельная масса [17–19 и др.]. Пространственно-временные изменения этих показателей, безусловно, сопровождаются преобразованием анатомической организации пластин и изменением химического состава.

Как уже говорилось, значительную часть сухого вещества водорослей составляют сложные высокомолекулярные полисахариды, способные увязывать огромное количество молекулярной

воды и давать вязкие коллоидные растворы. При этом различия в мономерном составе полисахаридов связаны с функцией тканей и обеспечивают гибкость и эластичность пластины. Наибольшей гибкостью отличаются ткани с преобладанием альгинатов, обогащенных ММ-блоками и гетерогенными участками (МГ-) [6]. На вязкость коллоидного раствора могут оказывать влияние также длина полимерных цепей и некоторые другие причины.

Для того чтобы выяснить влагоудерживающую способность тканей ламинарии, был проведен специальный эксперимент. Высечки, взятые у разновозрастных растений в разных третях пластины (рис. 2), в разные месяцы года высушивали при одинаковой температуре.

В течение всего периода просушивания через каждые 30 минут проводили их взвешивание. Определение содержания в пробе воды и сухого вещества вели по стандартной методике.

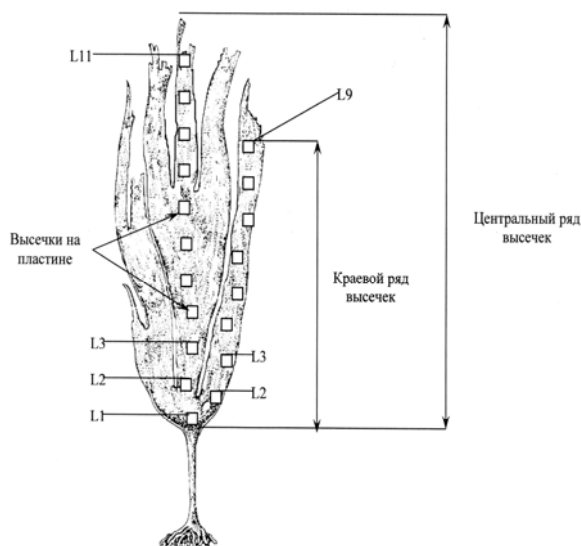


Рис. 2. Схема отбора высечек в пластинчатой части *Saccharina bongardiana*

Суть метода определения содержания воды заключалась в определении массы пробы путем взвешивания до и после полного высушивания и расчета массовой доли воды по формуле

$$X = \frac{(m_1 - m_2)100\%}{m_1 - m}$$

где m – масса бюкса с песком, г;

m_1 – масса бюкса с навеской и песком до высушивания, г;

m_2 – масса бюкса с навеской и песком после высушивания, г.

Изменение массы во времени определяло, с какой скоростью у растений происходила потеря влаги.

На рис. 3 представлены данные этого эксперимента для растений из бухты Вилючинская, где популяция *S. bongardiana* сохраняет свой природный облик. Согласно данному рисунку в мае у ламинарий всех возрастов 100%-ная влагоотдача происходит через 3 часа. Наиболее однообразно этот процесс протекает у двухлетних растений во всех частях пластины.

У однолетних на начало высушивания содержание воды во всех частях пластины было сопоставимо. Затем на промежутке времени от 0 до 2 ч в верхней части по сравнению с остальными влагоотдача имела большую скорость. На графике (см. рис. 3) также показано, что через 1,5 ч эксперимента у однолеток самым обводненным оставался низ. Здесь, по-видимому, концентрация

внутриклеточной жидкости самая высокая или же можно предполагать, что в этой части пластины в воде на долю неподвижной фракции приходится больший процент, чем обычно. Минимальное количество воды отмечается в верхней трети пластины, где, вероятно, вода более свободная.

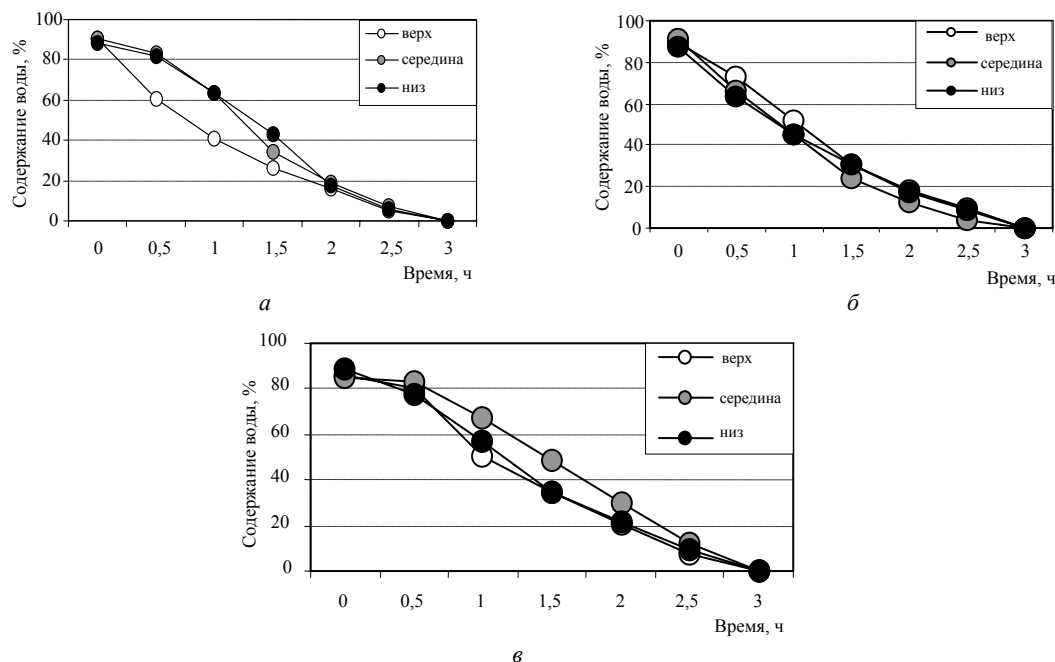


Рис. 3. Изменения содержания воды при высушивании верхней, средней и нижней частей пластины однолетних (а), двухлетних (б) и трехлетних (в) майских растений *Saccharina bongardiana* в бухте Вилючинская

У трехлетних ламинарий середина пластины изначально была обводнена в меньшей степени, чем другие части. Несмотря на это, во время просушивания влагоотдача в ней происходила незначительными порциями, особенно в течение первых 30 мин, и на протяжении всего времени просушивания в этой части пластины по сравнению с остальными оставалось максимальное количество воды.

В июле (рис. 4) продолжительность высушивания резко сокращается: в два раза у однолеток и трехлеток и в три раза у двухлеток.

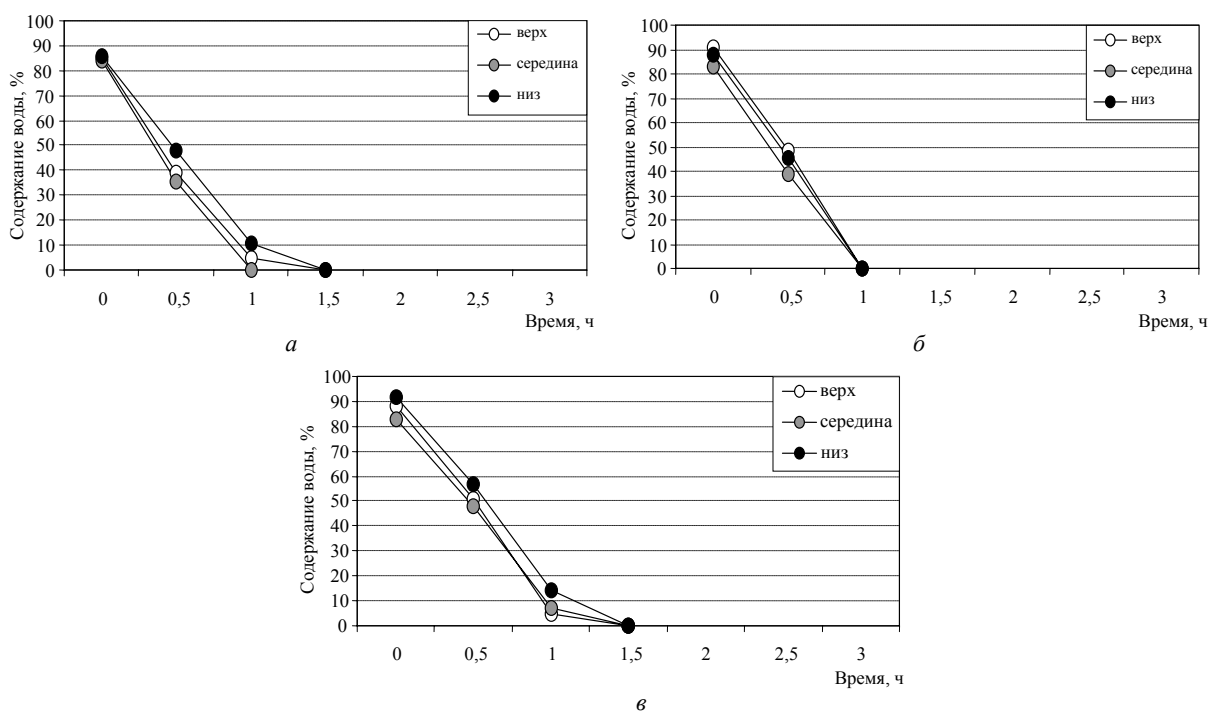


Рис. 4. Изменения содержания воды при высушивании верхней, средней и нижней частей пластины однолетних (а), двухлетних (б) и трехлетних (в) июльских растений *Saccharina bongardiana* в бухте Вилючинская

У однолетних в течение всего эксперимента наибольшее количество связанной воды содержится во внутритканевой жидкости нижней зоны пластины, а наименьшее – в средней. У двухлетних ламинарий на протяжении всего времени просушивания максимальное и минимальное распределение количества воды в пластине не нарушается. У трехлетних растений как в самом начале, так и в течение всего эксперимента максимальное количество воды наблюдается в нижней трети пластины.

Интересно то, что верхняя часть пластины в начале эксперимента была более обводнена, чем средняя, но уже через час она потеряла больше воды, чем средняя часть. В сентябре просушивание разновозрастных пластин *S. bongardiana* происходит несколько иначе (рис. 5). В это время, судя по уже приведенным данным, обводненность тканей у однолетних и двухлетних растений уменьшается, а у трехлетних увеличивается. При этом продолжительность высушивания у водорослей всех возрастов была одинаковой и составляла 1,5 ч, несмотря на то что состав внутритканевой жидкости у них в это время различается. Так, у однолеток доля сухого вещества в общем химическом составе в это время возрастает, но при этом 100%-ная влагоотдача наступает через такое же время, как и в летний период. У двухлеток при увеличении среднего содержания сухого вещества время просушивания возрастает. Вероятно, у них концентрация внутритканевой жидкости практически не изменяется, так как в это время при интенсивном ассимилировании продуктов фотосинтеза происходит большое расходование запасных веществ, обусловленное процессами активного осеннего роста и спороношения. Что касается распределения воды в разных частях пластин, то наибольшая доля связанной воды отмечается в средней трети. У трехлеток при значительном снижении среднего количества сухого вещества в пластинках с июля по сентябрь время просушивания пластины остается таким же, как в середине лета.

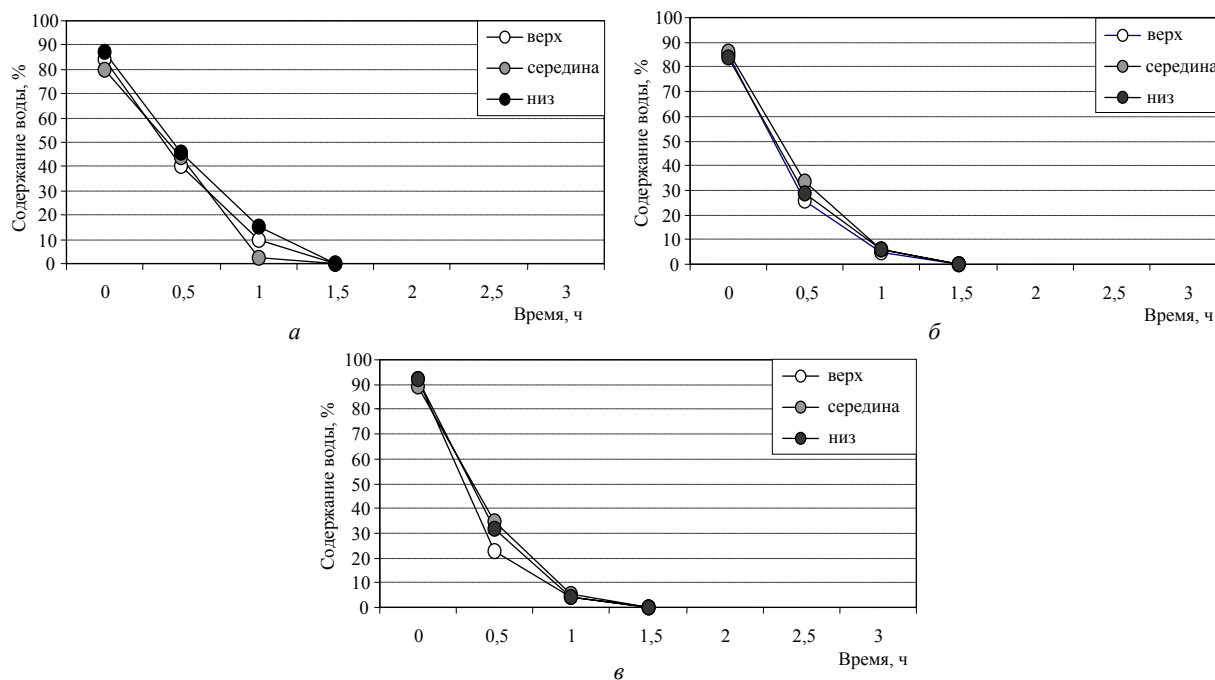


Рис. 5. Изменения содержания воды при высушивании верхней, средней и нижней частей пластины однолетних (а), двухлетних (б) и трехлетних (в) сентябрьских растений *Saccharina bongardiana* в бухте Вилючинская

По результатам проведенного эксперимента достаточно трудно судить об изменении состава сухих веществ и состоянии внутри- и межклеточной жидкости. Следует иметь в виду, что на скорость высушивания пластин большое влияние оказывает также их анатомическое строение, в частности толщина кутикулярного слоя, плотность меристодермы, размеры клеток внутренних тканей и другие особенности внутренней организации. Однако полученные нами данные имеют самостоятельную ценность и могут быть использованы для разработки рекомендаций по промыслу и технологии сушки *S. bongardiana*.

Литература

1. Камнев А.Н. Структура и функции бурых водорослей. – М.: МГУ, 1989. – 198 с.
2. Силкин В.А., Хайлов К.М. Биоэкологические механизмы управления в аквакультуре. – Л.: Наука, 1988. – 230 с.

3. Клочкова Н.Г., Березовская В.А. Водоросли камчатского шельфа: распространение, биология, химический состав. – Владивосток: Дальнаука, 1997. – 154 с.
4. Кизеветтер И.В., Грюнер В.С., Евтушенко В.А. Переработка морских водорослей и других промысловых водных растений. – М.: Пищ. пром-сть, 1967. – 407 с.
5. Подкорытова А.В. О составе и физико-химических свойствах альгиновой кислоты и альгинатов бурых водорослей // Исслед. по технологии рыбных продуктов. – Вып. 4. – Владивосток: ТИПРО, 1973. – С. 86–89.
6. Аминина Н.М., Подкорытова А.В. Альгинаты: состав, свойства, применение // Изв. Тихоокеанского науч.-исслед. рыбохозяйственного центра. – 1995. – Т. 118. – С. 130–137.
7. Усов А.И., Клочкова Н.Г. Бурые водоросли Камчатки как источник маннита // Биоорганическая химия. – 1994. – Т. 20. – № 11. – С. 1236–1241.
8. Подкорытова А.В., Аминина Н.М., Симоконов М.В. Сезонная динамика взаимодействия минеральных элементов с альгиновой кислотой в ламинарии японской // Исслед. по технологии гидробионтов дальневосточных морей: Сб. науч. ст. – Владивосток: ТИПРО, 1986. – С. 84–91.
9. Камнев А.Н. Возрастная морфофизиология бурых водорослей (на примере представителей порядков фукусовых и ламинариевых): Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – М., 1999. – 74 с.
10. Аминина Н.М. Особенности метаболизма ламинарии японской культивируемой: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. – М., 1995. – 22 с.
11. Бухрякова Л.К., Леванидов И.Т. Химический состав ламинариевых Сахалино-Курильского региона // Растительные ресурсы. – 1969. – Т. 5. – С. 183–187.
12. Трофимова Т.Н. Сравнительная характеристика накопления сухих веществ у разных представителей камчатских видов рода *Laminaria* в летний период // Пробл. охраны и рационального использ. биоресурсов Камчатки: Тез. докл. II науч.-практ. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2000. – С. 99–100.
13. Трофимова Т.Н. Особенности роста и развития камчатских промысловых водорослей *Laminaria bongardiana* P. et R. и *Laminaria yezoensis* Miyabe // Современные средства воспроизводства и использ. водных биоресурсов: Тез. докл. науч.-техн. симпозиума. – СПб., 2000. – С. 65–68.
14. Усов А.И., Смирнова Г.П., Клочкова Н.Г. Полисахаридный состав некоторых бурых водорослей Камчатки // Биоорганическая химия. – 2001. – Т. 27. – № 6. – С. 444–448.
15. Королева Т.Н. Географическая и экологическая изменчивость промысловой бурой водоросли *Laminaria bongardiana* у берегов Камчатки и Северных Курильских островов // Морские прибрежные экосистемы: водоросли, беспозвоночные и продукты их переработки: Тез. докл. I междунар. конф. – М., 2002. – С. 24–25.
16. Королева Т.Н. Сезонная динамика содержания воды и сухого вещества у бурой водоросли *Laminaria bongardiana* P. et R. // Ресурсы и средства рациональной эксплуатации прибрежных акваторий Камчатки: Материалы науч.-техн. конф. – Петропавловск-Камчатский, 2003. – С. 35–39.
17. Королева Т.Н. Развитие бурой водоросли *Laminaria bongardiana* P. et R. в прикамчатских водах: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. – М., 2004. – 25 с.
18. Королева Т.Н. Экологическая изменчивость плотности внутренних тканей камчатской бурой водоросли *Laminaria bongardiana* P. et R. // Науч. тр. Междунар. биотехнологического центра МГУ. – М.: МГУ, 2004. – С. 39.
19. Клочкова Н.Г., Трофимова Т.Н. Развитие внутренних тканевых структур ламинариевых водорослей в разных экологических условиях // Прибрежное рыболовство – XXI век: Тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. – Южно-Сахалинск, 2001. – С. 60–61.