

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ДОННЫХ ОСАДКОВ НА АНАТОМО-МЕТРИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ ВЕГЕТАТИВНОЙ СФЕРЫ МОРСКИХ ТРАВ ЧЕРНОГО МОРЯ

Изучено влияние гранулометрического состава донных осадков на 31 анатомо-метрический параметр вегетативных органов массовых видов морских трав Черного моря (*Zostera marina* L., *Z. noltii* Hornem. и *Ruppia cirrhosa* (Petagna) Grande). Выявлено, что ткани и воздухоносная система вегетативной сферы характеризуются высокой изменчивостью анатомо-метрических параметров, за счет которых происходит компенсация влияния факторов среды и адаптация растений к донным осадкам с различным гранулометрическим составом.

Массовые виды морских трав *Zostera marina* L., *Z. noltii* Hornem. и *Ruppia cirrhosa* (Petagna) Grande представляют основу трофических цепей мелководных бухт и заливов прибрежных экосистем Черного моря [4, 12]. Их сообщества оказывают существенное влияние на стабилизацию донных осадков и препятствуют разрушению береговой полосы [11, 12, 15]. В последние годы в результате активного освоения прибрежной зоны Чёрного моря происходит заиление донных осадков, снижение прозрачности вод, что приводит к сокращению естественных ареалов видов морских трав и деградации структуры их сообществ [3, 5, 9].

Донные осадки с различным гранулометрическим составом оказывают влияние на рост, морфологию и анатомию вегетативной сферы растения, поскольку они служат не только субстратом для закрепления подземных органов, но являются также средой, из которой абсорбируются питательные вещества [1, 8, 15, 17]. Влияние факторов среды отражается в совокупности структурно-функциональных перестроек на клеточном и тканевом уровне [11, 14]. Цель настоящей работы состояла в выявлении анатомо-метрических особенностей вегетативных органов массовых видов морских трав Черного моря и влияния на них гранулометрического состава донных осадков.

Материал и методы. Материал собран в период активной вегетации морских трав в бухте Казачья и устье реки Черная (Севастопольское взморье, 2000 - 2002 гг.). Определение гранулометрического состава донных осадков проведено сотрудниками Института геонинженерно-технических изысканий (ГИНТИЗ, г. Симферополь) пипеточным методом (ГОСТ 12536-79). В соответствии с методикой [7], в донных осадках выделили по 10 размерных фракций: ракуша (более 10 мм, 10 – 5 мм, 5 – 2 мм), гравий (1 - 2 мм), песок (1 - 0,1 мм), крупный алеврит (0,1 - 0,05 мм), мелкий алеврит (0,05 - 0,01 мм), крупный пелит, (0,01 - 0,005 мм и 0,005 - 0,001 мм), мелкий пелит (менее 0,001 мм).

Анатомо-метрическое исследование органов морских трав проводили на вегетативных, хорошо развитых, сходного состояния побегах. Влияние гранулометрического состава донных осадков на анатомическую структуру вегетативных органов морских трав исследовано для 31 анатомо-морфометрического параметра, из которых 10 относится к корню, 9 - корневищу, 12 – листу. Все данные статистически обработаны с использованием корреляционного и факторного анализа в пакете программ Statistica 6.0.

Результаты. *Z. marina*. по результатам факторного анализа параметры анатомо-метрической структуры данного вида и гранулометрического состава донных осадков, распределились по пяти факторам, которые объясняют 73,9 % общей изменчивости признаков. Первый фактор (18,6 %) объединил линейные размеры клеток ризодермы и её толщину, коррелирующих с такими фракциями, как песок ($r = -0,76$), крупный алеврит ($r = -0,87$) и пелит ($r = 0,78$). Второй фактор (21,9 %) выявил взаимосвязь между

величиной клеток мезодермы корня и его диаметром, толщиной дермы корневища с ракушей крупных размерных фракций (r варьирует от 0,85 до 0,94). Третий фактор (17,3 %) объединяет толщину листа и мезофилла, количество и объем полостей листа, которые отрицательно коррелируют с мелкими фракциями алеврита ($r = -0,64$). Четвертый (8,6%) и пятый (7,42 %) факторы не выявили связи параметров вегетативных органов zostеры и состава донных осадков.

Анализ корреляционной матрицы показал, что на состояние тканей корня *Z. marina* положительно влияет наличие в грунте всех фракций ракушки, а отрицательно – присутствие крупного алеврита и песка (табл. 1). На толщину дермы корневища фракции ракушки воздействуют отрицательно. Толщина листа снижается при наличии в грунте мелких фракций алеврита и пелита (табл. 1).

Таблица 1. Корреляционная зависимость между гранулометрическим составом донных осадков и анатомо-метрическими параметрами вегетативных органов *Zostera marina*

Table 1. Correlation dependence between the granulometric composition of bottom sediments and the anatomic-metrical parameters of *Zostera marina*

Состав донных осадков \ Параметры органа	Ракуша > 10 мм	Ракуша 10 – 5 мм	Ракуша 5 – 2 мм	Песок 1 - 0,1 мм	Крупный алеврит, 0,1 - 0,05 мм	Мелкий алеврит, 0,05 - 0,01 мм	Крупный пелит, 0,01 - 0,005 мм	Крупный пелит, 0,005 - 0,001 мм
Диаметр корня	0,68	0,57	0,73	-0,40	-0,63	-0,14	-0,11	-0,40
Ширина клеток дермы корня	-0,12	-0,17	0,48	-0,64	-0,73	0,47	0,65	0,22
Длина клеток мезодермы корня	0,60	0,54	0,34	-0,02	-0,14	-0,44	-0,33	-0,47
Ширина воздушной полости корня	-0,54	-0,40	-0,53	-0,06	0,09	0,44	0,41	0,65
Толщина дермы корневища	-0,74	-0,66	-0,58	0,30	0,35	0,20	0,24	0,36
Ширина клеток дермы корневища	0,69	0,59	0,39	0,14	0,02	-0,58	-0,57	-0,66
Толщина листовой пластинки	0,10	0,01	0,00	0,66	0,58	-0,66	-0,50	-0,65
Длина воздушной полости листа	-0,18	-0,11	-0,42	0,51	0,64	-0,16	-0,11	0,06
Количество полостей листа	-0,16	-0,24	0,03	0,32	0,55	-0,32	-0,13	-0,38
Объем воздушных полостей листа	0,13	0,16	-0,38	0,59	0,54	-0,62	-0,53	-0,36

Примечание: приведены только фракции донных осадков и анатомо-метрические параметры, проявляющие высокие и выше среднего значения коэффициента корреляции ($r > \pm 0,6$)

Zostera noltii. Исследуемые параметры распределились по 5 факторам, которые объясняют 69,8 % общей изменчивости признаков. Первый фактор (23,1%) объединяет ширину клеток ризодермы, линейные размеры клеток мезодермы корневища, на которые отрицательно влияют гравий, мелкий алеврит и крупный пелит (r изменяется от -0,72 до -0,79), а положительно - наличие песка ($r = 0,82$). Второй фактор (14,9%) объединяет признаки воздухоносной системы растения (длина полостей корня и листа), отрицательно коррелирующих с содержанием ракушки ($r = -0,88$) и положительно – крупного алеврита ($r = + 0,63$). Третий фактор (14,7%) показал отрицательную связь между диаметром корня и наличием различных фракций ракушки (r варьирует от -0,87 до -0,92). В четвертом (9,5 %) и пятом (7,7%) факторах не выявлено связи параметров органов *Z. noltii* с составом донных осадков.

При исследовании корреляционной матрицы обнаружено, что высокое содержание в грунте мелкой ракушки приводит к снижению длины воздухоносных полостей корня *Z. noltii*, а длина клеток его мезодермы увеличивается в присутствии песка (табл. 2). Диаметр корневища уменьшается при наличии фракций пелита, поскольку происходит снижение линейных размеров клеток мезодермы. На данные параметры оказывают положительное влияние песок и крупный алеврит. Для листа *Z. noltii* выявлена положительная корреляция между толщиной эпидермиса и наличием в грунте крупного пелита (табл. 2).

Таблица 2. Корреляционная зависимость между гранулометрическим составом донных осадков и анатомо-метрическими параметрами вегетативных органов *Zostera noltii*
Table 2. Correlation dependence between the granulometric composition of bottom sediments and the anatomic-metrical parameters of *Zostera noltii*

Состав донных осадков Параметры органа	Ракуша 5 – 2 мм	Песок 1 - 0.1 мм	Крупный алеврит 0,1 - 0,05 мм	Мелкий алеврит, 0,05 - 0,01 мм	Крупный пелит, 0,01 - 0,005 мм	Крупный пелит, 0,005 – 0,001 мм	Мелкий пелит, < 0,001 мм
Длина клеток мезодермы корня	-0,47	0,61	0,59	-0,31	-0,34	-0,14	-0,15
Длина воздушной полости корня	-0,69	0,39	0,55	-0,09	-0,22	0,30	0,17
Ширина воздушной полости корня	0,46	-0,33	-0,46	0,09	0,60	-0,22	0,52
Длина клеток мезодермы корневища	-0,29	0,72	0,59	-0,63	-0,60	-0,55	-0,54
Ширина клеток мезодермы корневища	-0,29	0,68	0,57	-0,61	-0,59	-0,51	-0,52
Толщина эпидермиса листа	-0,39	-0,30	-0,03	0,41	0,25	0,74	0,59

Примечание: то же, что и в табл. 1.

Ruppia cirrhosa. Все изученные параметры сгруппированы в 3 фактора, объясняющие 80,2 % суммарной дисперсии. Первый фактор (42,2 %) объединяет линейные размеры клеток дермы и мезодермы корня, клеток мезофилла листа, которые коррелируют с содержанием ракушки, гравия, мелких фракций алеврита и пелита (r изменяется от 0,7 до 0,97). Во второй фактор (24,1 %) основной вклад вносят такие параметры, как диаметр центрального цилиндра корня, толщина его мезодермы, а также толщина листа и его мезофилла, которые положительно связаны с содержанием песка и крупного алеврита (r изменяется от 0,7 до 0,8). Третий фактор (13,9 %) определяет связь между развитием лакунарной системы растения и наличием мелкой ракушки: зафиксирована корреляция с шириной полости корня ($r = 0,7$), длиной ($r = -0,7$) и объемом ($r = -0,7$) полостей листа.

Анализ корреляционной матрицы показал, что присутствие в грунте мелких фракций ракушки оказывает отрицательное влияние на состояние мезодермы корня руппии и тканей центрального цилиндра, тогда как песок и крупный алеврит - положительное (табл. 3). При наличии ракушки средних размеров происходит уменьшение длины полостей корня, а их ширина снижается в присутствии мелкого пелита. Высокая доля в грунте гравия, песка и крупного алеврита оказывает положительное влияние на линейные размеры клеток дермы корневища, а крупного пелита, мелкого алеврита и мелкой ракушки – негативное (табл. 3). Такие параметры, как толщина листа и мезофилла увеличиваются в присутствии в грунте песка и крупного

алеурита. Максимальный объем полостей листа *R. cirrhosa* наблюдается при высокой доли крупного пелита, а снижается при наличии в донных осадках ракуши (табл. 3).

Таблица 3. Корреляционная зависимость между гранулометрическим составом донных осадков и анатомо-метрическими параметрами вегетативных органов *Ruppia cirrhosa*
Table 3. Correlation dependence between the granulometric composition of bottom sediments and the anatomic-metrical parameters of *Ruppia cirrhosa*

Состав донных осадков	Ракуша 10 – 5 мм	Ракуша 5 – 2 мм	Гравий 1 - 2 мм	Песок 1 - 0,1 мм	Крупный алеурит 0,1 - 0,05 мм	Мелкий алеурит. 0,05 - 0,01 мм	Крупный пелит. 0,01 - 0,005 мм	Мелкий пелит. < 0,005 мм
Параметры органа								
Толщина мезодермы корня	-0,23	-0,68	-0,21	0,79	0,77	-0,50	-0,48	-0,21
Диаметр центрального цилиндра корня	-0,48	-0,54	-0,22	0,62	0,68	-0,12	-0,24	-0,15
Длина клеток дермы корня	-0,61	-0,17	-0,28	0,41	0,42	0,07	-0,07	-0,22
Ширина клеток дермы корня	0,51	0,61	-0,23	-0,18	-0,32	-0,32	-0,25	-0,35
Длина воздушной полости корня	-0,63	-0,02	-0,32	0,49	0,41	-0,09	-0,16	-0,32
Ширина воздушной полости корня	0,18	0,38	-0,39	0,16	0,03	-0,37	-0,37	-0,61
Длина клеток дермы корневища	-0,12	-0,61	-0,24	0,88	0,77	-0,76	-0,64	-0,32
Ширина клеток дермы корневища	0,19	0,15	0,63	-0,34	-0,46	-0,02	0,31	0,51
Толщина листа	-0,51	-0,46	-0,31	0,53	0,63	0,01	-0,18	-0,21
Толщина мезофилла листа	-0,54	-0,44	-0,29	0,53	0,61	0,01	-0,17	-0,19
Объем воздушных полостей листа	-0,13	-0,63	0,15	0,08	0,22	0,18	0,11	0,62

Примечание: то же, что и в табл. 1.

Обсуждение. В ходе факторного анализа выявлено, что большинство изученных анатомо-метрических параметров вегетативных органов морских трав испытывают негативное влияние мелких фракций алеурита и пелита, хотя считается, что *Z. marina* тяготеет к илистым грунтам [6, 8, 15]. В то же время, известно, что большинство видов морских трав испытывают гипоксию при произрастании на илистых субстратах, она особенно негативно влияет на метаболизм и морфометрические параметры вегетативных органов zostеры [1, 8, 16]. Все мелкие фракции грунта оказывают отрицательное воздействие на толщину листовой пластинки и линейные размеры клеток покровной ткани корневища. Данное явление, вероятно, объясняется недостатком кислорода в илистых донных осадках, при котором у *Z. marina* и *Z. noltii* наблюдается снижение активности транспорта углерода между вегетативными органами и грунтом, а также уменьшение показателей фотосинтетической активности надземной сферы [13]. Считают, что существование морских трав в этих условиях возможно за счёт развития воздухоносной системы подземных вегетативных органов растения [17]. По-видимому, это связано тем, что кислород, выделяясь из крупных воздухоносных полостей корня в грунт, образует аэробную среду вокруг корневой системы. В подобных условиях обеспечивается активное поглощение нитратов и других соединений из околор корневого пространства растения для осуществления его метаболизма [13].

Повышенное содержание ракуши отрицательно влияет на структуры вегетативных органов *Z. noltii* и *R. cirrhosa*, особенно на параметры корня и воздухоносной системы растения. Поскольку наличие ракуши повышает аэрированность грунта [13], это, очевидно, препятствует развитию воздухоносной системы корня и листа у zostеры и руппии в условиях значительного содержания ракуши в донных осадках. Ряд исследователей указывает также, что в этих условиях наблюдается снижение толщины дермы корневища и увеличение ширины ее клеток у *Z. marina* [6, 10].

У *Z. noltii* и *R. cirrhosa* на песчаном грунте зафиксировано наилучшее развитие клеток мезодермы корня и корневища. Недостаток азотного питания, характерного для песчаных субстратов, компенсируется активным транспортом веществ из донных осадков, за счет увеличения площади клеток мезодермы подземных органов [2]. Количество и линейные размеры этих клеток определяют толщину мезодермы корня и корневища, крупные размеры которых свидетельствуют о высокой накопительной способности образующих их тканей [2].

В свою очередь, значительная доля песка в грунте приводит к уменьшению биомассы *Z. marina*, длины её побегов, толщины и ширины листьев, величины их покровной ткани, количества сосудисто-волокнистых пучков и воздухоносных полостей листа, а также диаметра корневища [1, 3, 8, 10, 15]. Выполненный факторный анализ выявил среднюю степень корреляции между песчаными фракциями и такими параметрами *Z. marina*, как толщина листовой пластинки ($r = +0,56$) и объем воздухоносных полостей ($r = +0,59$). При этих условиях общая тенденция к снижению основных параметров листа и биомассы *Z. marina* сохраняется, поскольку увеличение толщины листовой пластинки определяется развитием воздухоносной системы, а не основной тканью вегетативного органа. Кроме того, влажный песок является труднопроницаемым субстратом для подземных побегов *Z. marina*, из-за чего в структуре её корней и корневищ увеличивается количество склеренхимных клеток, тогда как линейные размеры клеток покровной ткани корня снижаются [10].

Таким образом, произрастание морских трав на донных осадках различного гранулометрического состава, возможно, объясняется высокой вариабельностью параметров их анатомической структуры, что обеспечивает их высокую приспособляемость к различным факторам среды.

Выводы: 1. Анатомо-метрические параметры органов морских трав, проявляющие высокий уровень корреляции с гранулометрическим составом донных осадков: у *Zostera marina* – диаметр корня и ширина его воздухоносных полостей, ширина клеток дермы корня и корневища, толщина листовой пластинки и объем полостей в листе; у *Z. noltii* – толщина слоя мезодермы корневища и линейные размеры её клеток; у *Ruppia cirrhosa* – толщина слоя мезодермы корня, длина клеток дермы корневища, толщина листа и слоя мезофилла, объем воздухоносных полостей листа. 2. Высокое содержание в донных осадках ракуши различных размерных фракций определяет уменьшение линейных размеров воздухоносных полостей корня морских трав, а наличие пелита и крупного алеврита – развитие крупных полостей у *Z. marina* и *Z. noltii*. У *R. cirrhosa* мелкие фракции грунта оказывают отрицательное воздействие на линейные размеры воздухоносных полостей и клеток корня. 3. Линейные размеры клеток мезодермы и дермы корневищ *Z. noltii* и *R. cirrhosa* положительно коррелируют с донными осадками, которые характеризуются высоким содержанием песка и крупного алеврита. 4. Выявлена положительная корреляция толщины листа *Z. marina* и *R. cirrhosa* с содержанием песка и крупного алеврита. Для zostеры данный параметр определяется развитием воздухоносной системы и увеличением ее объема, для руппии – количеством слоев мезофилла листа. 5. Основной особенностью тканей вегетативных органов морских трав является их высокая изменчивость, за счет которой происходит адаптация растений к условиям среды обитания.

1. Александров В.В. Взаимосвязь морфоструктуры черноморской *Zostera marina* L. и гранулометрического состава донных осадков // Экология моря. – 2001. – Вып. 58. – С. 45–49.
2. Белявская Н.А. Корень: тканевый, клеточный и молекулярный уровни // Клеточные механизмы адаптации растений к неблагоприятным воздействиям экологических факторов в естественных условиях. – К.: Наукова думка, 2003. – С. 137–170.
3. Иванов В.А., Долотов В.В., Гурьева Л.А. Экологическая безопасность прибрежной зоны Черного и Азовского морей и комплексное использование ресурсов шельфа // Исследование шельфовой зоны Азово–Черноморского бассейна: сборник научных трудов. – Севастополь, 1995. – С. 8–18.
4. Калугина–Гутник А.А. Фитобентос Черного моря. – К.: Наукова думка, 1975. – 246 с.
5. Калугина–Гутник А.А. Антропогенные изменения донной растительности Черного моря. Мониторинг, оценка, прогнозирование // Шестой съезд ВГБО: Тезисы докладов. – Мурманск, 1991. – Ч. 1. – С. 59–60.
6. Куликова Н.М., Иванова И.К. Анатомо–морфологическая характеристика *Zostera marina* L. из Севастопольской бухты // Биология моря. – 1972. – 26. – С. 133–145.
7. Логвиненко Н.В. Морская геология. – Л.: Недра, 1980. – 344 с.
8. Мильчакова Н.А. Статистический анализ влияния гранулометрического состава донных осадков на численность и размерную структуру популяций морфоструктуры *Zostera marina* L. в Черном море // Экология моря. – 1989. – Вып. 32. – С. 59–63.
9. Мильчакова Н.А., Рябогина В.Г. Флористическая характеристика морских акваторий объектов природно–заповедного фонда региона Севастополя (Черное море) // Экология моря. – 2002. – Вып. 60. – С. 5–11.
10. Паймеева Л.Г. Биология *Zostera marina* L. и *Zostera asiatica* Miki Приморья. Владивосток: Автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.05 / ДВНЦ АН СССР. – Владивосток, 1984. – 24 с.
11. Duarte C.M. Seagrass depth limits // Aquatic Botany. – 1991. – 40, № 4. – P. 363–377.
12. Milchakova N.A. On the status of seagrass communities in the Black Sea // Aquatic Botany. – 1999. – 65. – P. 21–32.
13. Penhale P.A., Wetzel R.G. Structural and functional adaptations of eelgrass (*Zostera marina* L.) to the anaerobic sediment environment // Canad. J. Botany. – 1983. – 61. – P. 1421–1428.
14. Peralta G., Bouma T.J., Jvan Soelen T.J. On the use of sediment fertilization for seagrass restoration: a mesocosm study on *Zostera marina* L. // Aquatic Botany. – 2003. – 75, № 2. – P. 95–110.
15. Phillips R.C., Menez E.G. Seagrasses. – Washington: Smithsonian Institution Press, 1988. – 104 pp.
16. Short F.T., Coles R.G., Pergent-Martini C. Global seagrass distribution // Global seagrass research methods. – Amsterdam: Elsevier Science B.V., 2001. – P. 5–31.
17. Thayer G.W., Kenworthy W.J., Fonseca M.S. The ecology of eelgrass meadows of the Atlantic coast: A community profile. – Portland: U. S. Fish and Wildlife Service, 1984. – 147 pp.

Институт биологии южных морей НАН Украины,
г. Севастополь

Получено 15.11.2007

E. V. KIREEVA

INFLUENCE OF BOTTOM SEDIMENTS GRANULOMETRIC COMPOSITION ON ANATOMIC-METRICAL PARAMETERS OF VEGETATIVE SPHERES SEAGRASS MASS SPECIES OF BLACK SEA

Summary

It is studied that bottom sediments granulometric composition influences 31 parameters of the vegetative organs anatomic structure of *Zostera marina* L., *Z. noltii* Hornem. and *Ruppia cirrhosa* (Petagna) Grande. It is revealed that tissues and auriferous system of vegetative organs seagrass are characterized by high changeableness of anatomic-metrical parameters at the expense of which there is compensation of environment factors influence and adaptation of plants to bottom sediments with different granulometric composition.