

Московская школа на Юго-Западе №1543

Кафедра биологии

**Морфологическая и анатомическая изменчивость представителей
секции *Lemna* Некоузского района Ярославской области**

Выполнили учащиеся 9-го «Б» класса:

Александра Яшина

Алиса Шубина

Научный руководитель:

П.А. Волкова

Москва

2025

ВВЕДЕНИЕ

Ряска (род *Lemna*, подсем. Lemnoideae, сем. Araceae) это водное растение, широко распространённое на территории России (Volkova et al., 2024). Фронды ряски состоят в основном из клеток хлоренхимы, разделённых большими межклеточными полостями, заполненными воздухом, что обеспечивает плавучесть растения. В настоящее время на территории умеренной Евразии произрастает несколько видов ряски. В европейской части России встречаются такие виды, как *Lemna minor*, *Lemna turionifera*, их гибрид *Lemna × japonica*, *Lemna gibba*, встречаемость *L. turionifera* и *L. gibba* в регионе была подтверждена в 2024 году (Volkova et al., 2024). Наиболее часто встречается *L. minor* (Маевский, 2014). *L. turionifera* распространена за Уралом и, в отличие от *L. minor*, может образовывать турионы (зимующие почки) в неблагоприятных условиях (Landolt, 1986). *L. minor* не образует турионов и, следовательно, не выживает в более континентальном климате.

Lemna запасает крахмал и летом быстро вегетативно размножается, удваивая массу своего тела за шесть дней (Леонова Т.Г., 1982). Она запасает большое количество крахмала в виде крахмальных зёрен и при этом быстро размножается, поэтому мы можем рассматривать её в качестве потенциального источника крахмала. В частности, исследователей интересует изменчивость количества запасённого крахмала в зависимости от таксона, условий среды и других факторов. По предварительным данным, у разных видов наблюдается различное количество запасаемого крахмала, в среднем *L. minor* запасает его больше чем *L. gibba* (Sree and Appenroth., 2022). Мы не нашли статей со сравнением запасаемого крахмала у *L. turionifera*, но так как, в отличие от остальных видов секции, она образует турионы, мы ожидаем встретить у неё большее количество запасенного крахмала, чем у других видов. Так, мы можем предположить различную степень пользы от выделения крахмала из растений разных таксонов. В настоящее время изменчивость количества запасённого крахмала у рясок рода *Lemna* недостаточно изучена, для её изучения необходима возможность надежного различения данных таксонов. При разграничении таксонов из секции *Lemna* наблюдаются затруднения из-за высокой изменчивости внутри каждого таксона, а также внутри одной популяции. Морфологически виды секции *Lemna* не отличаются четко друг от друга, анатомическая изменчивость недостаточно изучена, но некоторые авторы предлагают различать виды секции по размеру воздушных полостей (Маевский, 2014). *L. gibba* отличается от остальных видов секции выпуклыми снизу фрондами, а если они плоские, то имеются крупные (более 0.3 мм) воздушные полости. У *L. minor* воздушные полости размером 0.1-0.15 мм, у *L. turionifera* - 0.2-0.25мм (Маевский, 2014). В настоящее время можно надёжно различить данные таксоны при помощи генетического анализа – полиморфизм длины интрона гена β -тубулина (Braglia et al., 2021). В нашем исследовании мы хотим дополнительно изучить внутривидовую и внутрипопуляционную изменчивость содержания крахмала у данных таксонов. Мы предполагаем, что количество и размер крахмальных зёрен могут являться диагностическими признаками. В нашем исследовании мы изучаем анатомические признаки рода *Lemna* и возможность использования их как диагностических. Таким образом мы можем сформулировать цель и задачи:

ЦЕЛЬ

Изучить изменчивость анатомии ряски в зависимости от таксона и различных факторов.

ЗАДАЧИ

1. Сравнить содержание крахмала у рясок разных таксонов;
2. Изучить встречаемость таксонов ряски в одном водоёме;
3. Изучить изменчивость фрондов одного экземпляра ряски;
4. Изучить анатомическую изменчивость разных таксонов ряски.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Мы собирали популяции ряски из различных пресных водоёмов окрестностей пос. Борок, Ярославской обл. с 28.06.25 по 02.07.25 и записывали координаты и типы данных водоёмов (река, пруд и т.п.) (табл.1). Транспортировка популяций до лагеря происходила в пластиковых банках или, реже, в целлофановых пакетах. В лагере ряска хранилась в открытых ёмкостях с водой из р. Шумаровки.

Таблица 1. Дата, место сбора и количество взятых и количество генетически определённых растений из каждого водоёма.

Водоём	Дата сбора	Координаты	Пояснение	Количество взятых растений	Количество генетически определённых растений
1	22.06.2025	57.96548, 38.26302	лужа, 1 км к востоку от дер. Аристово	5	-
2	22.06.2025	57.96268, 38.26600	р. Ксенофонка, 1.5 км к северу от дер. Труфаново	4	1
3	22.06.2025	57.94738, 38.28236	р. Сутка, 2.5 км к северо-востоку от пос. Шестихино	4	-
4	22.06.2025	57.95547, 38.28538	р. Сутка, 500 м к востоку от дер. Петрушино	4	-
5	22.06.2025	57.97678, 38.25550	р. Осиновка, 300 м к юго-западу от дер. Жилкино	4	-
6	22.06.2025	57.97647, 38.24321	р. Осиновка, 1 км к западу от дер. Жилкино	4	-
7	25.06.2025	58.16778, 38.14994	бобровая плотина на р. Вайя, 4 км к северо-западу от пос. Иванцево	12	2
8	28.06.2025	58.00241, 38.21894	р. Ильд, окрестности дер. Горки	10	9
9	28.06.2025	58.00328, 38.22820	заводь на р. Ильд, 600 м к югу от пос. Мурзино	12	6
10	02.07.2025	58.045537,	р. Сунога, 2 км к югу от пос.	12	-

		38.242560	Борок		
11	02.07.2025	58.042672, 38.245594	пруд, 2 км к югу от пос. Борок	13	9



Рисунок 1. Места сбора растений (цифрами показаны номера популяций, буквами – отмеченные виды: m – *Lemna minor*, j – *Lemna japonica*, t – *Lemna turionifera*, g – *Lemna gibba*)

Всего было отобрано и описано по 4-5 экземпляров ряски из популяций 1-6 и по 10-12 экземпляров из популяции 7-11. Мы делали срезы в центральной части наиболее крупного фронда ряски под биноклем Микромед МС-2 Zoom и изучали их под микроскопом. У четырех экземпляров ряски мы описали по одному срезу двух наиболее крупных фрондов для дальнейшего сравнения изменчивости признаков внутри одного растения. Оставшиеся после подготовки препаратов фронды мы упаковывали в конвертики из туалетной бумаги для хранения в силикагеле до генетического анализа. Мы измеряли параметры, используя окуляр-микrometer, откалиброванный по объект-микrometerу. На увеличении 7х40 одно деление окуляр-микrometerа соответствовало 4.17 мкм.

Были описаны:

1. Толщина фрондов (мкм);
2. Толщина аэренхимы (мкм);
3. Количество рядов полостей;
4. Длина и ширина пяти полостей (мкм): 2-3 наибольшие и 2-3 наиболее характерные для фронда по размеру;

5. Количество крахмала (содержание в клетке по трёхбалльной шкале: 1-в единичном количестве, 2-менее половины объёма клетки, 3-более половины объёма клетки);
6. Размер крахмальных зёрен (также по шкале: 1-менее 4.17 мкм, 2-от 4.17 до 10,43мкм, 3- более 10.43 мкм. Такие значения шкалы мы взяли так как они соответствовали целому количеству делений окуляр-микрометра).



Рисунок 2. 1 – толщина фронда; 2 – толщина аэренхимы; 3 – ширина полости; 4 – длина полости

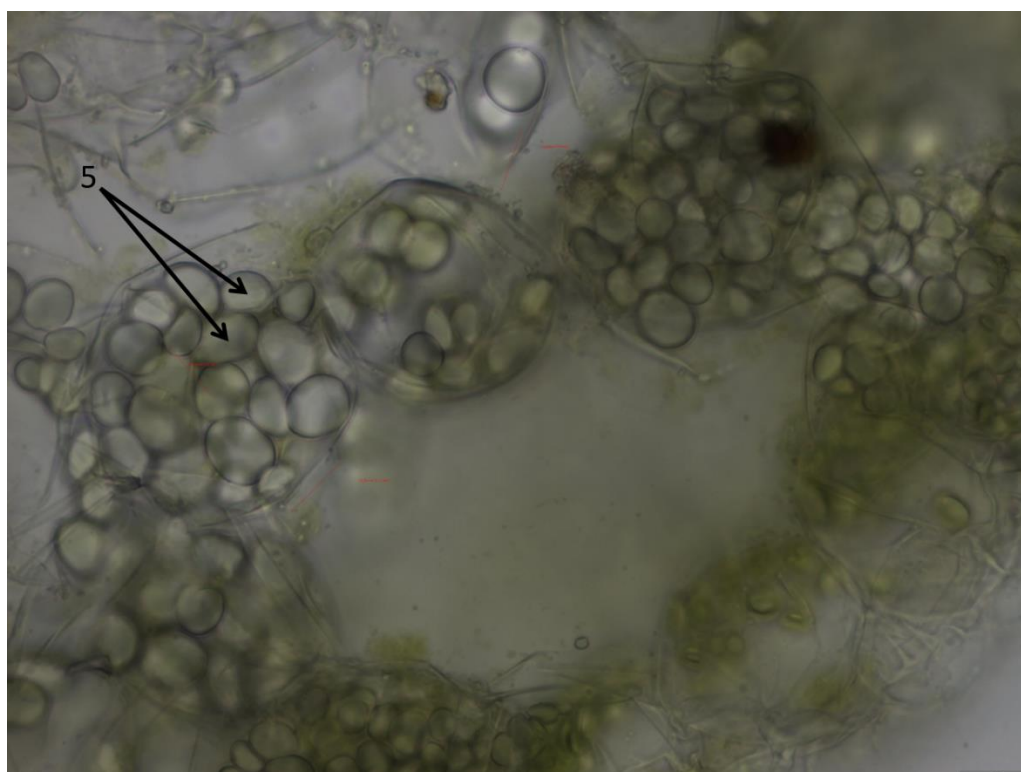


Рисунок 3. 5 – крахмальные зерна. На данном объекте в клетке по нашей шкале количество крахмала = 3.

Нами были предоставлены молекулярные определения для 27 растений: 1 экземпляра из 2 популяции, 2 экземпляров из 7 популяции, 9 экземпляров из 8 популяции, 6 экземпляров из 9 популяции и 9 экземпляров из 11 популяции (данные предоставлены П.А. Волковой). При этом мы отметили 14 растений вида *Lemna minor*, 1 – *Lemna gibba*, 7 – *Lemna × japonica* и 5 – *Lemna turionifera*.

Полученные данные мы обрабатывали при помощи языка и среды для статистического анализа R (R Core Team, 2024), там же создавали диаграммы и графики для представления данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Морфологические различия между двумя фрондами одного растения

Мы изучили изменчивость исследованных признаков у двух фрондов одного растения (табл. 2). У двух фрондов одного растения всегда было одинаковое число полостей. У обоих фрондов одного растения были отмечены единичные зерна крахмала, у обоих фрондов другого растения зерна крахмала занимали меньше половины клетки (2 балла). У остальных двух растений в одном фронде крахмал занимал меньше половины клетки, а во втором – больше (2 и 3 балла соответственно). У трех растений размер крахмальных зерен у двух фрондов был одинаковым, а у четвертого различался на одно деление шкалы. Наибольшее различие количественных признаков между двумя фрондами одного растения представлено в таблице.

Таблица 2. Номер растения (номер водоёма и растения через “_”) и насколько отличаются признаки у двух его фрондов. Значение 0 означает отсутствие различий. *по шкале: 1 – единичные крахмальные зёрна, 2 – менее половины объёма клетки, 3 – более половины объёма клетки. Одно деление равно 4,17 мкм. **одно деление шкалы окуляр-микрометра.

Растение	Толщина фронда, мкм	Толщина аэренхимы, мкм	Число рядов полостей	Максимальный размер полости, мкм	Количество крахмала, баллы*	Размер крахмальных зёрен, деление шкалы**
8_8	4,2	50	0	20,9	2/3	0
8_10	68	21,7	0	51,2	1	0
9_3	33,4	29,2	0	58,4	2	0
9_6	62,6	29,2	0	29,2	2/3	1
Наиб.	68	50	0	58,4		1

Связь между различными морфологическими признаками

Мы анализировали взаимосвязь между исследованными признаками для всех проанализированных растений, включая то большинство, таксономическая принадлежность которых неизвестна.

Толщина аэренхимы положительно коррелирует с толщиной фронда (рис. 4), $r = 0.91$ (тест Пирсона, $p = 2.2 \times 10^{-16}$)

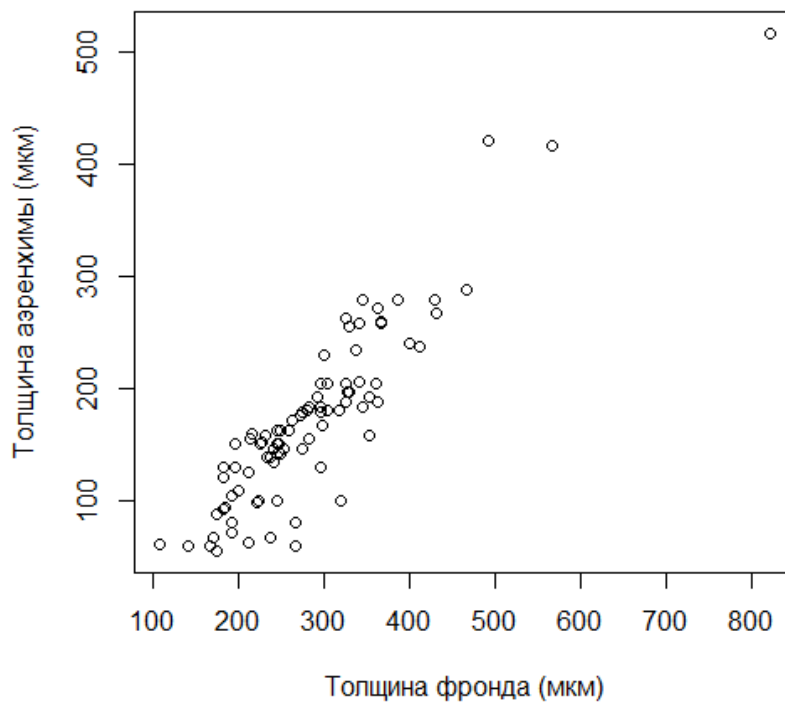


Рисунок 4. Корреляция толщины фронда и аэренхимы внутри выборки

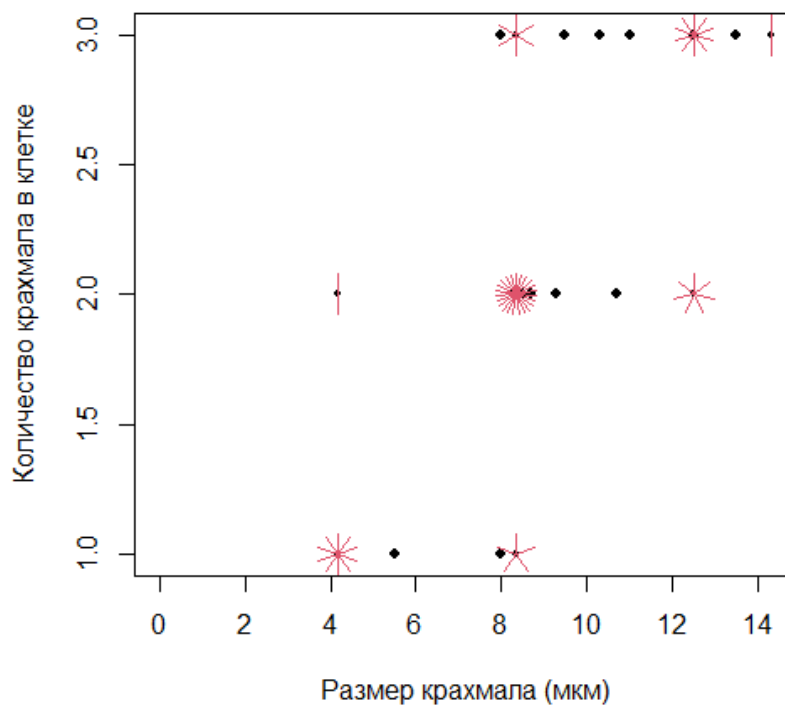


Рисунок 5. Корреляция количества и размера крахмальных зерен внутри выборки (количество крахмала по шкале: 1-в единичном количестве, 2-менее половины объёма клетки, 3-более половины объёма клетки)

Численность крахмальных зерен положительно коррелирует с их размером (рис. 5), $r = 0.69$ (тест Пирсона, $p = 2.7 \times 10^{-12}$). Одиночные крахмальные зерна всегда были мельче 8,34 мкм. Более многочисленные крахмальные зерна почти всегда были крупнее 8,34 мкм.

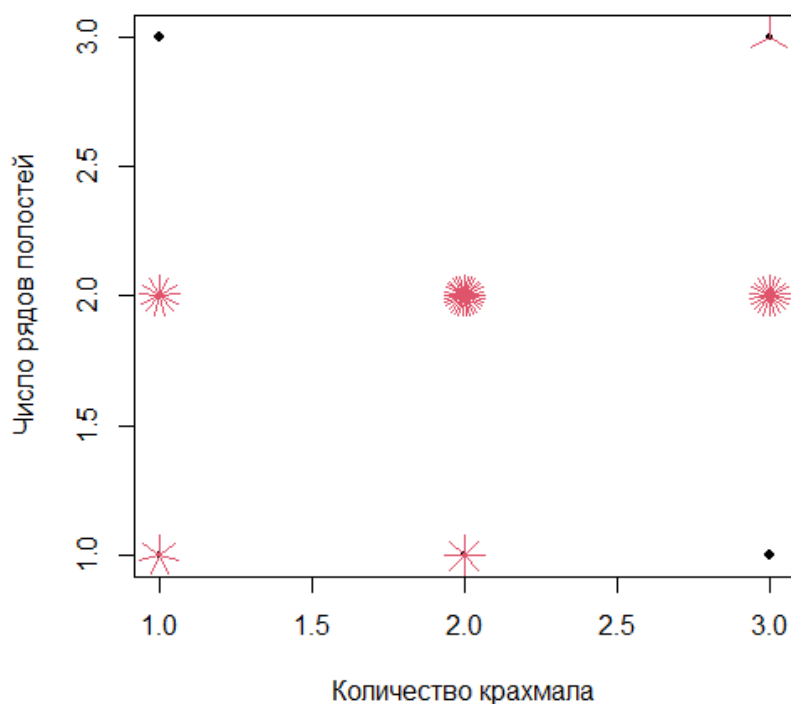


Рисунок 6. Корреляция числа рядов полостей и количества крахмала в клетке внутри выборки (количество крахмала по шкале: 1-в единичном количестве, 2-менее половины объёма клетки, 3-более половины объёма клетки)

У растений с одним рядом полостей крахмальные зерна занимали менее половины клетки, за единичным исключением (рис. 6). Было всего четыре растения с тремя рядами полостей, поэтому мы не можем уверенно говорить о изменчивости содержания крахмала у них.

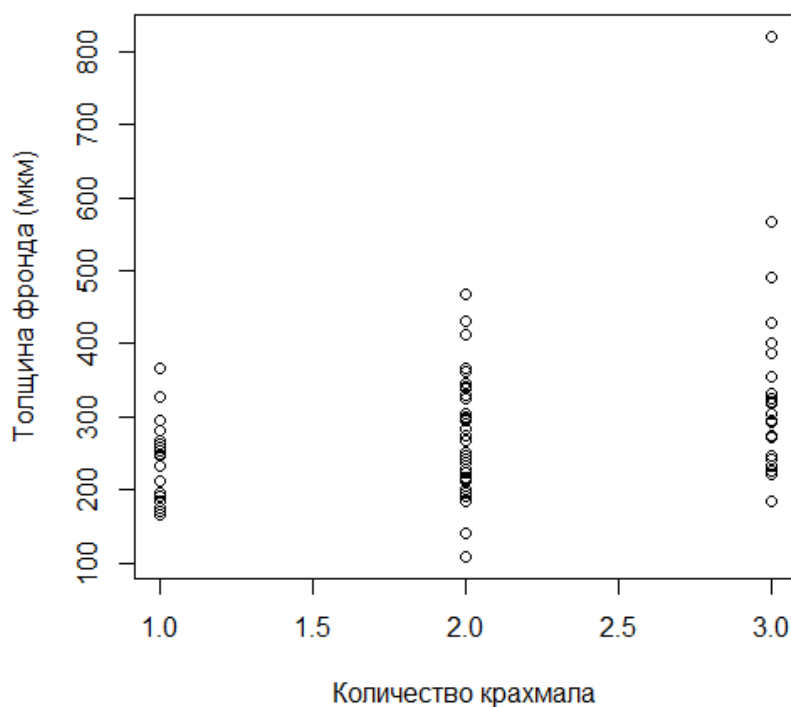


Рисунок 7. Корреляция толщины фронда и количества крахмала внутри выборки (количество крахмала по шкале: 1-в единичном количестве, 2-менее половины объёма клетки, 3-более половины объёма клетки)

Мы не нашли положительной корреляции между размером фронда и количеством крахмала у растения (рис. 7).

Морфологическая изменчивость таксонов секции *Lemna*

При помощи молекулярно-генетического анализа (полиморфизм длин TUBB1) мы надёжно установили таксономическую принадлежность 27 растений из пяти популяций (табл. 3).

Таблица 3. Таксономический состав ряски (секция *Lemna minor*), установленный при помощи молекулярно-генетического анализа.

Водный объект	<i>L. gibba</i>	<i>L. × japonica</i>	<i>L. minor</i>	<i>L. turionifera</i>	Местонахождение
2	0	0	1	0	р. Ксенофонка, 3,8 км к северо-востоку от пос. Шестихино
7	0	0	2	0	бобровая плотина на р. Вайя
8	1	2	6	0	р. Ильд, 8,1 км к северу от пос. Шестихино
9	0	4	2	0	заводь на р. Ильд, 8 км к северу от пос. Шестихино
11	0	1	3	5	пруд, 2 км к югу от пос. Борок
всего	1	7	14	5	

В р. Ксенофонка и р. Вайя мы проанализировали одно-два растения и обнаружили только *L. minor*. В р. Ильд (водный объект 8) и в пруду у посёлка Борок, где проанализировали не менее шести растений, обнаружили более одного таксона. Во всех трёх водоемах произрастали *L. minor* и *L. × japonica*, в р. Ильд (водный объект 10) к ним добавилась *L. gibba*, а в пруду рядом с посёлком Борок – *L. turionifera*.

Малое число генетически определенных растений не позволяет нам провести статистический анализ, поэтому ниже мы охарактеризуем морфологию таксонов.

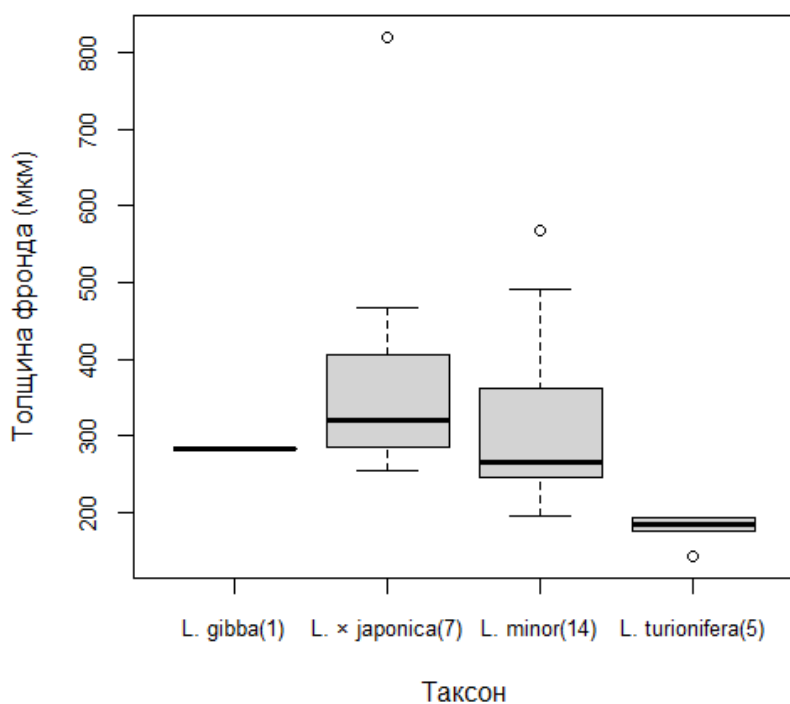


Рисунок 8. Изменчивость толщины фрондов у растений различных таксонов. Темная черта в середине обозначает медиану, верхний и нижний края «ящика» — верхний и нижний квартили, а «усы» — минимум и максимум. В скобках указан объем выборки по таксону.

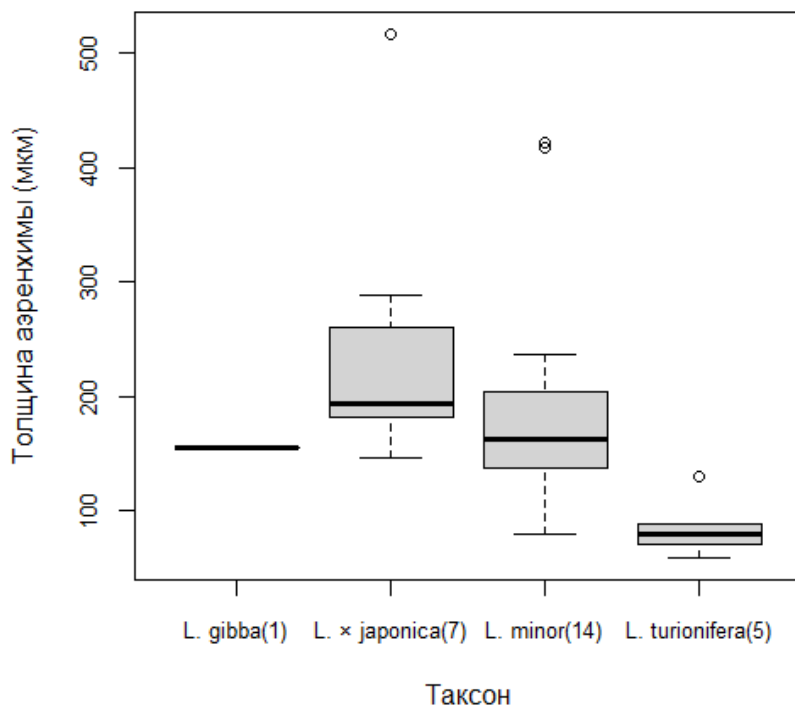


Рисунок 9. Изменчивость толщины аэренхимы у растений различных таксонов. Темная черта в середине обозначает медиану, верхний и нижний края «ящика» — верхний и нижний квартили, а «усы» — минимум и максимум. В скобках указан объем выборки по таксону.

У *L. turionifera* фронды самые тонкие (менее 200 мкм) (рис. 8-10). Остальные таксоны по толщине фронда и аэренхимы не отличаются (тест Краскела-Уоллиса, $p = 0.3$, тест Краскела-Уоллиса, $p = 0.22$). В данном случае значимой изменчивостью мы считаем значение, большее максимального значения изменчивости признака внутри одного растения (табл. 2). Изменчивость размера фрондов и аэренхимы у *L. turionifera* ниже, чем у остальных таксонов.

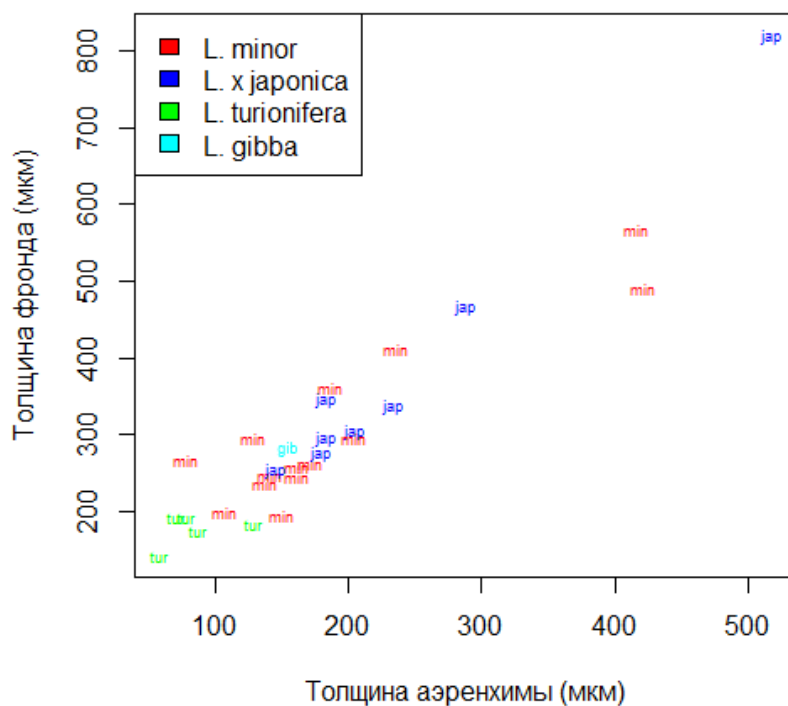


Рисунок 10. Корреляция толщины фронда и аэренхимы у растений различных таксонов.

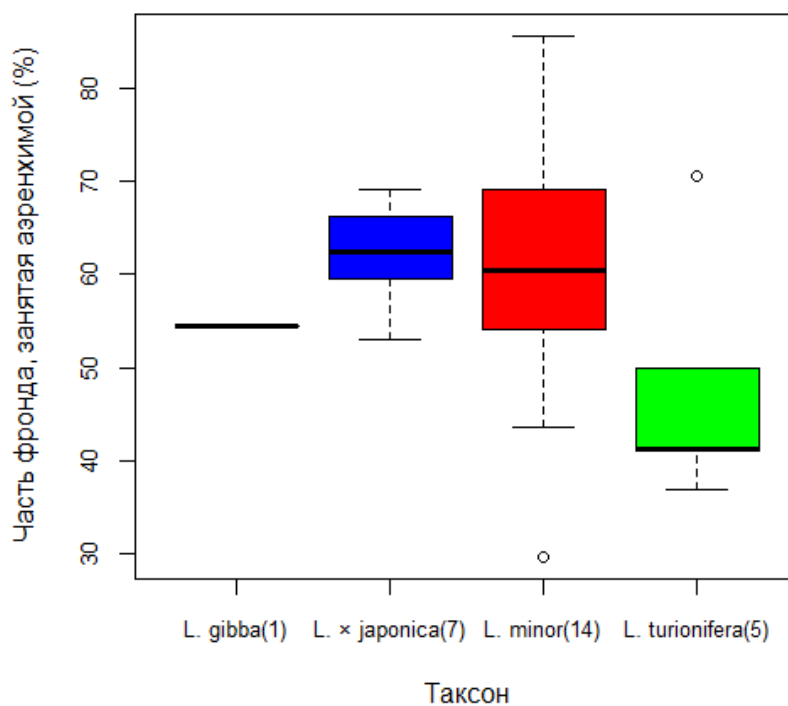


Рисунок 11. Изменчивость отношения толщины аэренхимы к толщине фронда у растений различных таксонов. В скобках указан объем выборки по таксону.

У *L. turionifera* аэренхима занимает менее 50% фронда (рис. 11). Аэренхима *L. x japonica* занимает 50-70% фронда, у *L. minor* изменчивость данного признака более высокая, аэренхима может занимать 40-90% фронда.

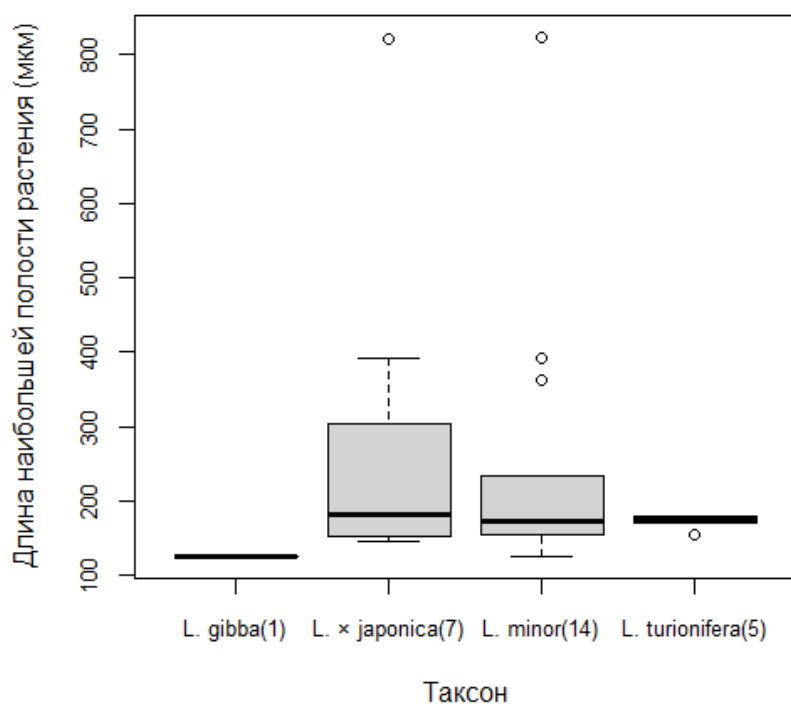


Рисунок 12. Изменчивость длины полостей у растений различных таксонов. Темная черта в середине обозначает медиану, верхний и нижний края «ящика» — верхний и нижний квартили, а «усы» — минимум и максимум. В скобках указан объем выборки по таксону.

У *L. turionifera* самая низкая изменчивость длины наибольшей полости. Мы отметили растения видов *L. minor* и *L. x japonica* с наибольшими полостями более 300 мкм, у единственного растения *L. gibba* была самая маленькая полость (рис. 12). При этом у *L. turionifera* не было полостей размером более 200 мкм.

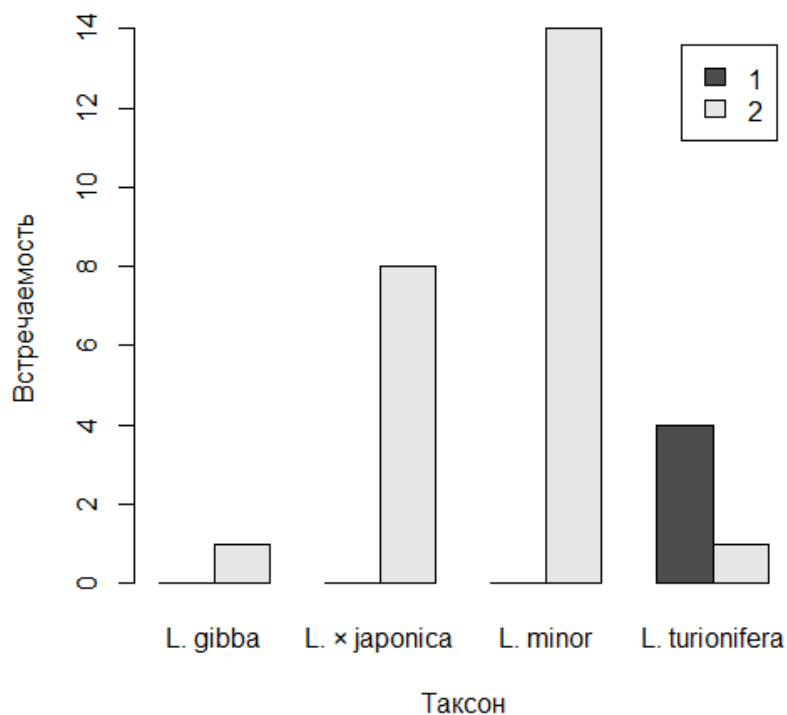


Рисунок 13. Изменчивость количества рядов полостей у растений различных таксонов.

У видов *L. minor*, *L. × japonica* и *L. gibba* мы отметили только растения с двумя рядами полостей, у растений вида *L. turionifera* был один ряд полостей за единичным исключением (рис. 13).

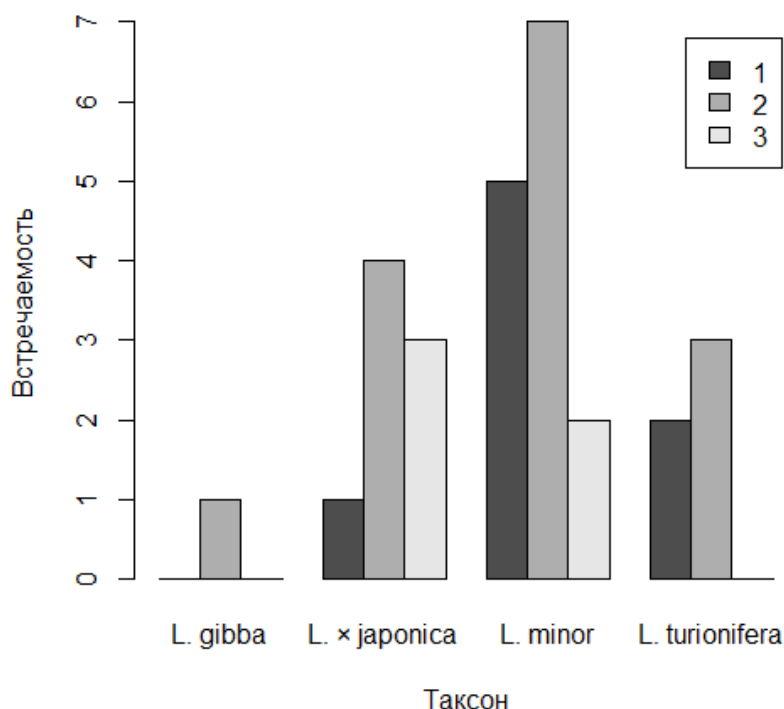


Рисунок 14. Встречаемость растений с разным количеством крахмала у различных таксонов (по шкале: 1-в единичном количестве, 2-менее половины объёма клетки, 3-более половины объёма клетки)

У *L. minor* и *L. × japonica* крахмал мог занимать разный объем клетки (от единичных зёрен до большей части объёма) (рис. 14). У *L. turionifera* и у *L. gibba* крахмал всегда занимал менее половины клетки. Мы не обнаружили достоверных различий между количеством крахмала у растений разных таксонов (тест Краскела-Уоллиса, $p = 0.2$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Распространённость

L. minor присутствовала во всех водоемах, в которых мы определяли растения, это подтверждает ее распространённость в европейской части России (Маевский, 2014). В водоемах 2 и 7 мы обнаружили только *L. minor*, однако из данных водоемов мы определили только по 1-2 растения, поэтому не можем достоверно утверждать отсутствие других таксонов. *L. × japonica* всегда находилась в водоемах вместе с *L. minor*, это можно объяснить тем, что она является гибридом *L. minor* и *L. turionifera*. Однако *L. × japonica* могла также произрастать отдельно от *L. turionifera*. Мы обнаружили растения видов *L. turionifera* и *L. gibba*, это подтверждает данные Volkova et al. (2024) о их присутствии в данном регионе. Мы отметили *L. turionifera* только в одном водоеме, это подтверждает ее меньшую распространённость (Landolt, 1986).

Морфологические различия между двумя фрондами одного растения

Мы отметили схожесть двух фрондов одного растения. Несмотря на то, что у двух растений было разное количество крахмала в разных фрондах, значения были близки (2 и 3 по шкале), поэтому мы считаем их схожими. Это позволило нам исследовать признаки выборки, приняв за значимую изменчивость максимальное значение изменчивости признака внутри одного растения.

Морфологическая изменчивость таксонов секции *Lemna minor*

Несмотря на различное количество растений, определенных в различных водоемах, мы обнаружили различия некоторых признаков разных таксонов секции. *L. turionifera* имеет самые маленькие значения размеров фронда и аэренхимы, ее аэренхима занимает меньший процент фронда, чем у других таксонов. При этом мы не ожидали обнаружить то, что *L. turionifera* запасает меньше крахмала, чем растения других таксонов, так как крахмал необходим для образования турионов (Landolt, 1986). Несмотря на это, *L. turionifera* имеет меньше аэренхимы и, следовательно, больший процент запасующих крахмал клеток, поэтому мы предполагаем, что она запасает крахмал ближе к осени.

Единственный экземпляр *L. gibba* имеет самую маленькую наибольшую полость, менее 300 мкм. Это не противоречит Маевскому (2014), так как растение имеет маленький размер (толщина фронда менее 300 мкм). Мы отметили растения вида *L. minor* с полостями более 150 мкм, что противоречит Маевскому (2014). Средний размер наибольшей полости *L. turionifera* совпадает со средним размером полости по Маевскому (2014).

Хотя мы не можем напрямую проверить данные Sree and Appenroth (2022) о способности *L. minor* запасать больше крахмала, чем *L. gibba* из-за того, что у нас было всего одно растение *L. gibba*, на основании нашей небольшой выборки по трём остальным таксонам мы показали, что содержание крахмала не различается у растений разных таксонов. Эти расхождения с литературными данными можно объяснить тем, что мы брали растения из природных популяций, и в данном случае количество крахмала зависит скорее от условий обитания, чем от таксономической принадлежности. *L. turionifera* имеет наименьшую изменчивость и наименьшие значения каждого из признаков, значения признаков *L. × japonica* и *L. minor* пересекаются, их нельзя достоверно отделить друг от друга. Кроме этого, мы отметили высокую изменчивость всех признаков *L. minor* и *L. × japonica*, предположительно из-за их близости и высокой распространенности *L. minor* (Маевский, 2014).

ВЫВОДЫ

1. Мы не обнаружили значимых различий изменчивости крахмала у растений разных таксонов секции *Lemna* ввиду высокой внутривидовой изменчивости и маленькой выборки.
2. *L. minor* присутствовала во всех водоемах, *L. × japonica* всегда находилась в водоемах вместе с *L. minor*. Мы отметили *L. turionifera* только в одном водоеме, что подтверждает ее меньшую распространённость.
3. Мы отметили анатомическую схожесть двух фрондов одного растения.
4. *L. turionifera* имеет наименьшую изменчивость и наименьшие значения каждого из признаков, значения признаков *L. × japonica* и *L. minor* пересекаются. Мы отметили высокую

изменчивость всех признаков *L. minor* и *L. × japonica*, предположительно из-за их близости и высокой распространенности *L. minor*.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим Полину Андреевну Волкову за генетический анализ ряски; Марию Олеговну Иванову и Лину Гапуровну Матиеву за помощь в сборе и описании ряски; Людмилу Андреевну Абрамову за помощь в сборе ряски; Администрацию стационара “Сунога”, в особенности Александра Витальевича Крылова, за возможность проведения исследований на территории стационара; Сергея Менделевича Глаголева и Екатерину Викторовну Елисееву за организацию летней практики.

ЛИТЕРАТУРА

- 1) Леонова Т.Г. Семейство рясковые (Lemnaceae) // Жизнь растений. Т.6. М.: Просвещение, 1982. С. 493-501
- 2) Маевский П. Ф., Флора средней полосы европейской части России. 11-е изд.-- М: Товарищество научных изданий КМК, 2014
- 3) Braglia, L., Lauria, M., Appenroth, K.J., Bog, M., Breviario, D., Grasso, A., Gavazzi, F., Morello, L., 2021. Duckweed species genotyping and interspecific hybrid discovery by tubulin-based polymorphism fingerprinting. Front. Plant Sci. 12, 625670
- 4) Landolt, E., 1986. The family of Lemnaceae – a monographic study. Vol. 1. Veröff. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel. Zürich. Hf. 71. S. 1–566
- 5) R Core Team (2024). _R: A Language and Environment for Statistical Computing_. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>
- 6) Volkova P.A., Ivanova M.O., Efimov D.Yu., Chemeris E.V., Vinogradova Yu.S., Grishutkin O.G., Konotop N.K., Efimova L.A., Tikhomirov N.P., Zueva N.V., Bobrov A.A., 2024. Climate-dependent distribution of *Lemna minor*, *L. turionifera* and *L. × japonica* (Lemnaceae) in temperate Eurasia and high variability of their genome size. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, Vol. 65, 125831