

Научная статья

УДК 573.6

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-1-50-56>



Влияние поверхностно-активных веществ (додецилсульфата натрия, цетилтриметиламмония бромид) на проницаемость клеточных мембран корнеплодов красной столовой свеклы *Beta vulgaris* L.

М.В. Крапивная*✉, В.А. Домрачева*, Д.И. Стом*.*.*.*.*

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация

**Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

***Байкальский музей СО РАН, п. Листвянка, Российская Федерация

Аннотация. Изучено воздействие двух ПАВ на красную столовую свеклу *Beta vulgaris* L.: анионоактивного – додецилсульфата натрия (ДСН), катионоактивного – цетилтриметиламмония бромид (ЦТАБ). Степень повреждения тканей корнеплодов *Beta vulgaris* L. оценивалась по усилению выхода электролитов из клеток кондуктометрическим методом, вакуолярных пигментов бетацианинов – спектрофотометрическим методом. Показано, что ДСН не нарушал проницаемость клеточных мембран в концентрациях до 0,05 г/л, ЦТАБ – до 0,005 г/л. Повышение содержания указанных ПАВ приводило к последовательному увеличению выхода электролитов и бетацианинов из тканей свеклы, что свидетельствовало о негативном действии ПАВ. При этом прослеживалась хорошая концентрационная зависимость: чем больше было содержание изучаемых детергентов, тем выше значения удельной электропроводности и оптической плотности инкубационных растворов. При обработке тестируемого растения исследуемыми соединениями в концентрации 1 г/л наблюдали значительный токсический эффект. Так, через 2 ч от начала измерений электропроводность водного раствора, в котором инкубировали высежки корнеплодов свеклы, предварительно подвергнутые 30-минутной обработке растворами 1 г/л ДСН и ЦТАБ, увеличивалась до 42 и 81 мкСм/см соответственно, что на 89 и 272% больше значений контроля. В то же время выход бетацианинов превышал значения контроля на 327 и 805% соответственно. В ходе экспериментов установлено, что ДСН и ЦТАБ увеличивают проницаемость мембран растительных клеток: как плазмолеммы, так и тонопласта. Испытанные методы зарекомендовали себя как быстрые (время получения ответа – 3 ч) и эффективные, они могут быть рекомендованы для экспрессной оценки интенсивности влияния ПАВ на растительные организмы, изучения мембранотропного действия веществ, для контроля при селекции сельскохозяйственных культур растений на устойчивость к неблагоприятным условиям.

Ключевые слова: *Beta vulgaris* L., кондуктометрический метод, спектрофотометрический метод, выход электролитов, проницаемость клеточных мембран, поверхностно-активные вещества

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 19-29-05213.

Для цитирования: Крапивная М.В., Домрачева В.А., Стом Д.И. Влияние поверхностно-активных веществ (додецилсульфата натрия, цетилтриметиламмония бромид) на проницаемость клеточных мембран корнеплодов красной столовой свеклы *Beta vulgaris* L. // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2023. Т. 13. N 1. С. 50–56. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-1-50-56>.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Original article

Effect of surfactants (sodium dodecyl sulfate, cetyltrimethylammonium bromide) on cell membrane permeability of red beet roots *Beta vulgaris* L.

Mariya V. Krapivnaya*✉, Valentina A. Domracheva*, Devard I. Stom*.*.*.*.*

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

**Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

***Baikal Museum of the SB RAS, Listvyanka, Russian Federation

Abstract. The paper considers the effect of two surfactants – anionic sodium dodecyl sulfate (SDS) and cationic cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) – on red beet root *Beta vulgaris* L. Damage to root tissues of *Beta vulgaris* L. was assessed in terms of an increased release of electrolytes and vacuolar pigments of betacyanins from cells using

© Крапивная М.В., Домрачева В.А., Стом Д.И., 2023

conductometric and spectrophotometric methods, respectively. It was shown that SDS and CTAB do not impair the cell membrane permeability at concentrations of up to 0.05 and 0.005 g/l, respectively. An increase in the concentration of these surfactants led to a subsequent rise in the electrolyte and betacyanin release from the beet tissues, indicating the negative effect of the surfactants. A good concentration dependence was observed, i.e., higher concentrations of the studied detergents correlated with higher values of the electric conductivity and optical density of the incubation solutions. A significant toxic effect was noted when the test plant was treated with the studied compounds at a concentration of 1 g/l. Thus, two hours after the onset of measurements, the electrical conductivity of the aqueous solution, in which the beet roots previously subjected to 30-min treatment with 1 g/l SDS and CTAB solutions were incubated, increased to 42 and 81 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectively. These values exceeded the reference values by 89 and 272%, respectively. At the same time, the betacyanin yield exceeded the reference values by 327 and 805%, respectively. The experiments showed that SDS and CTAB increase the permeability of plant cell membranes of both plasmalemma and tonoplast. The tested methods proved to be fast (three hours response time) and efficient. These methods can be used to rapidly assess the effect of surfactants on plant bodies, to study the membranotropic effect of substances, and to control the breeding crop plants in terms of their resistance to unfavourable conditions.

Keywords: *Beta vulgaris* L., conductometric method, spectrophotometric method, electrolyte release, cell membrane permeability, surfactants

Funding. The reported study was funded by the RFBR grant 19-29-05213.

For citation: Krapivnaya M.V., Domracheva V.A., Stom D.I. Effect of surfactants (sodium dodecyl sulfate, cetyltrimethylammonium bromide) on cell membrane permeability of red beet roots *Beta vulgaris* L. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(1):50-56. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-1-50-56>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время поверхностно-активные вещества (ПАВ) находят свое применение в самых разнообразных сферах деятельности человека. ПАВ широко используются как в повседневной жизни человека (в бытовых чистящих и косметических средствах благодаря высокой способности пенообразования), так и во многих промышленных процессах [1]. Это неизбежно сопровождается попаданием ПАВ в окружающую среду, что, в свою очередь, не может не сказываться на состоянии растительных организмов.

Клеточная мембрана растительной клетки растворима в растворах ПАВ [2]. Молекулы ПАВ имеют амфифильную структуру, в которой гидрофильные «головки» молекулы контактируют с поверхностью, а гидрофобные «хвосты» оказываются в контакте с раствором¹ [3]. ПАВ сольбилизируют мембранные белки, имитируя бислой липидов. Белки, встроенные в липидные бислой мембраны, включаются в эти мицеллы посредством гидрофобных взаимодействий. Теперь они окружены слоем молекул ПАВ, а гидрофильные части подвергаются воздействию водной среды [2]. Эти свойства позволяют ПАВ снижать поверхностное натяжение между двумя несмешивающимися фазами и нарушать целостность клеточных липидных мембран [1, 2, 4].

Одними из самых распространенных ПАВ являются додецилсульфат натрия и цетилтриметиламмония бромид.

Додецилсульфат натрия (ДСН, SLS, $\text{NaC}_{12}\text{H}_{25}\text{SO}_4$), также известный как лаурилсульфат натрия, является наиболее изученным анионным сульфатным ПАВ, широко используемым в качестве эмульгирующего чистящего средства [5]. Поэтому ДСН очень часто встречается в сточных водах [6].

По данным литературных источников, ДСН в определенных концентрациях токсичен для растений. Он вызывает замедление роста корней, снижает содержание

хлорофилла а и хлорофилла b в листьях, тем самым влияя на эффективность фотосинтеза [7]. Согласно данным из исследования Саксонова М.Н. и соавторов, ДСН в концентрации 85,1 мг/л оказывал тормозящее действие на рост числа новых листьев водного растения ряски малой (*Lemna minor* L.) на 50% [8]. Помимо этого, ДСН вызывает снижение активности антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутазы, каталазы, аскорбатпероксидазы и глутатионредуктазы), а также приводит к появлению симптомов окислительного стресса [7].

Другой известный детергент – цетилтриметиламмония бромид (ЦТАБ, СТАВ, $\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{NBrl}$) – относится к представителям катионных ПАВ. Он состоит из гидрофобной цепи из 16 атомов углерода и четвертичного аммония. ЦТАБ применяют в косметике в качестве биоцидов, антистатиков, поверхностно-активных моющих средств, эмульгаторов и суспендирующих агентов [9, 10]. Помимо применения в косметических и моющих средствах, ЦТАБ также используется в биотехнологии [11, 12]. Среди обычно используемых катионных ПАВ ЦТАБ имеет самую длинную алкильную цепь и самую низкую критическую концентрацию мицеллообразования. Это объясняет, почему ЦТАБ способствует активному разрушению клеточных мембран [10]. ЦТАБ очень токсичен для водных организмов. Он может оказывать долговременное неблагоприятное воздействие на водные организмы [9, 13].

Синтетические ПАВ, к которым относятся ДСН и ЦТАБ, получают из труднобиodeградируемых компонентов. Это может пагубно сказываться на состоянии окружающей среды. Кроме того, ПАВ способствуют увеличению содержания фосфора, что может вызывать цветение воды [14].

Внешнему воздействию поллютантов, в том числе ПАВ, в первую очередь подвергаются наружные мембраны клеток. Следовательно, одним из самых первых признаков повреждения растительных тканей может служить нарушение барьерных свойств их по-

¹Холмберг К., Йёнссон Б., Кронберг Б., Линдман Б. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах. М.: Лаборатория знаний, 2020. 531 с.

верхностных структур [15]. Изменение проницаемости клеточных мембран приводит к выходу клеточных электролитов в окружающую среду. Поэтому значительное увеличение электропроводности раствора, содержащего ткань с поврежденными клетками, свидетельствует о нарушении избирательной проницаемости мембран [16, 17]. Простой способ количественно охарактеризовать этот процесс состоит в измерении электропроводности раствора, содержащего ткань с поврежденными клетками [18].

Кроме выхода электролитов, при повреждении вакуолярной мембраны – тонопласта – корнеплодов свеклы *Beta vulgaris* L. наблюдается и выход в инкубационную среду красно-фиолетовых водорастворимых пигментов – бетацианинов. Красящая способность последних позволяет применить спектрофотометрический метод для оценки повреждения вакуолярных мембран клеток.

Основным пигментом корнеплодов свеклы *Beta vulgaris* L., относящимся к группе бетацианинов, является бетанидин-5-О-β-гликозид (бетанин) [19]. Содержание бетацианинов значительно различается между сортами [20]. Для эксперимента был выбран сорт Бордо, данный сорт является одним из наиболее распространенных сортов в сельском хозяйстве нашей страны и поэтому находится в легкой доступности². Сообщается, что уровень накопления бетацианинов корнеплодов свеклы сорта Бордо составляет 68 мг/100 г [21], по другим данным – 35 мг/100 г [22].

Целью настоящей работы явилось изучение воздействия ПАВ (ДСН, ЦТАБ) и определение их действующих и недействующих концентраций на клеточные мембраны растительных клеток на примере корнеплодов свеклы *Beta vulgaris* L.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектом исследования служили корнеплоды красной столовой свеклы *Beta vulgaris* L. сорта Бордо. К моменту исследования корнеплоды находились в овощехранилище в течение 4 месяцев при температуре 2–4 °С. Ткани корнеплодов подвергали воздействию ПАВ: ДСН (х.ч., ООО «АО РЕАХИМ», Россия) и ЦТАБ (х.ч., AppliChem GmbH, Германия). Установлено, что гранулированная форма лучше растворима в воде и менее токсична, чем порошкообразная, поэтому в наших экспериментах использовали гранулированную форму ДСН [1].

Одним из наиболее быстрых и эффективных способов оценки степени повреждения клеточных мембран является кондуктометрический метод. С применением этого метода оценивали степень повреждения клеточных мембран по относительному выходу электролитов из тканей свеклы, обработанной ПАВ, по сравнению с контролем (необработанные ПАВ высежки корнеплодов свеклы)³ [15]. Для этого в наших опытах на 100 мл раствора приходилась выборка по 5 кубиков свеклы размером 1 см³ (7,3±0,2 г). Высежки делали при помощи металлической кубикорезки из предварительно нарезанных дисков свеклы толщиной 1 см. Для экспери-

мента кубики брали ближе к поверхности корнеплодов, где концентрация бетацианина была наибольшей.

Предварительно кубики из корнеплодов столовой свеклы вымачивали под проточной водой в течение 30 мин. После чего их по 5 штук выдерживали в 100 мл испытуемых растворов (ДСН 1; 0,5 и 0,05 г/л; ЦТАБ 1; 0,05 и 0,005 г/л) в течение 30 мин. В контрольном варианте экспонирование проводили в дистиллированной воде. Затем материал, подвергнутый воздействию ПАВ, промывали дистиллированной водой и переносили в емкости с равным объемом дистиллированной воды, электропроводность и оптическую плотность которой предварительно измеряли. Сразу после погружения материала определяли электропроводность с использованием кондуктометра Эксперт-002 (ООО «Эконикс-Эксперт», Россия) с датчиком погружного типа УЭП-П-С для лабораторных измерений.

Параллельно с замерами электропроводности проводили определение оптической плотности на спектрофотометре ЭКРОС ПЭ-5400УФ (ООО «Экротхим», Россия) при максимуме поглощения бетацианинов в видимом диапазоне – 537 нм [20]. Измерения осуществляли через каждые 30 мин, вплоть до 2-х ч от начала измерений.

Все эксперименты проводили в 3-х независимых опытах, по 2 повторности в каждом. Статистическую обработку данных выполняли с помощью пакета программ Microsoft Office. Выводы сделаны при вероятности безошибочного прогноза P≥0,95.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученная в экспериментах кинетика выхода электролитов и бетацианина из тканей столовой свеклы под воздействием растворов ДСН (0,05; 0,5 и 1 г/л) в интервале времени от 0 до 120 мин представлена на рис. 1 и 2.

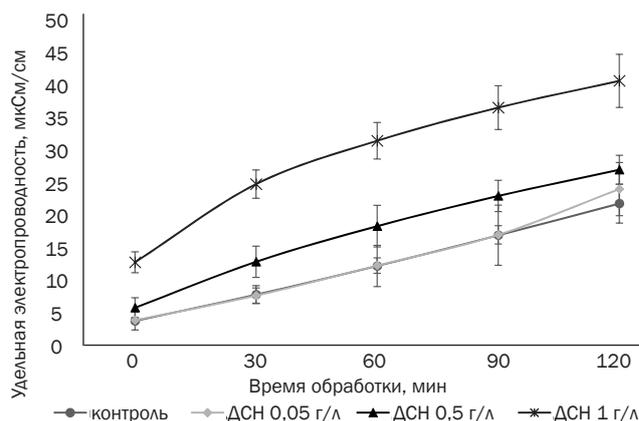


Рис. 1. Динамика выхода электролитов из ткани корнеплодов *Beta vulgaris* L. после воздействия растворов додецилсульфата натрия в концентрациях 0,05; 0,5 и 1 г/л

Fig. 1. Dynamics of the release of electrolytes from the *Beta vulgaris* L. roots after exposure to SDS solutions at concentrations of 0.05; 0.5 and 1 g/l

²Елизаров О.А. Дифференцирующая роль условий выращивания и отбора на проявление сортовых признаков у свеклы столовой: на примере сорта Бордо 237: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М., 2002. 23 с.

³Тыняная И.И. Разделение, концентрирование и анализ антоцианов и бетацианинов в экстрактах растительного сырья с применением оптических и хроматографических методов: автореф. дис. ... канд. хим. наук. Воронеж, 2015. 15 с.

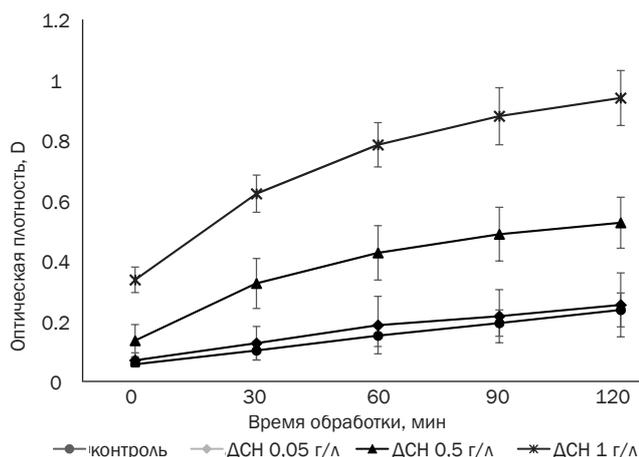


Рис. 2. Динамика выхода бетацианинов из ткани корнеплодов *Beta vulgaris* L. после воздействия растворов додецилсульфата натрия в концентрациях 0,05; 0,5 и 1 г/л

Fig. 2. Dynamics of the release of betacyanins from the *Beta vulgaris* L. roots after exposure to SDS solutions at concentrations of 0.05; 0.5 and 1 g/l

На рис. 1, 2 явно прослеживалась концентрационная зависимость эффекта: чем больше концентрация ДСН, тем выше значения удельной электропроводности и оптической плотности изучаемых образцов. Таким образом, наибольшие показатели удельной электропроводности и оптической плотности наблюдали в образцах с концентрацией ДСН 1 г/л. В этом случае через 2 ч эксперимента они достигали значений 41,7 мкСм/см и 0,94 D соответственно, что в сравнении с контролем (22,1 мкСм/см и 0,22 D) выше на 89 и 327% соответственно. Удельная электропроводность и оптическая плотность раствора ДСН в концентрации 0,05 г/л приближены к контролю. Это позволяет сделать вывод, что при таком содержании ДСН не оказывал видимого влияния на проницаемость мембран тканей

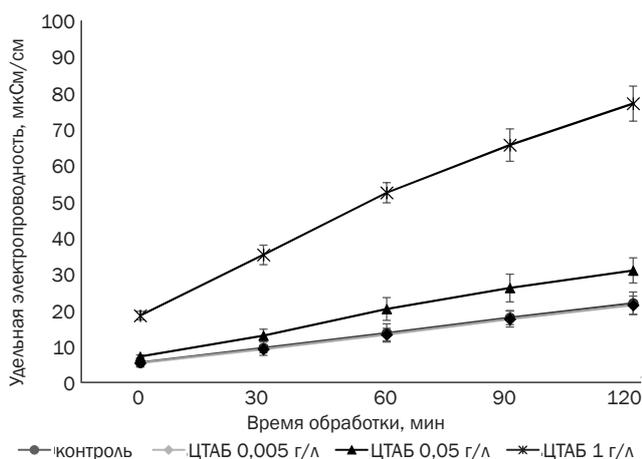


Рис. 3. Динамика выхода электролитов из ткани корнеплодов *Beta vulgaris* L. после воздействия растворов цетилтриметиламмония бромид в концентрациях 0,005; 0,05 и 1 г/л

Fig. 3. Dynamics of the release of electrolytes from the *Beta vulgaris* L. roots after exposure to CTAB solutions at concentrations of 0.005; 0.05 and 1 g/l

корнеплодов столовой свеклы. Таким образом, судя по эффектам на клеточные мембраны, недействующими концентрациями ДСН явились концентрации <0,05 г/л, действующими – >1 г/л.

Эксперименты по изучению воздействия ЦТАБ проводили по аналогии с опытами в присутствии ДСН. На рис. 3 и 4 представлены кривые выхода электролитов и бетацианина из тканей корнеплодов столовой свеклы под воздействием ЦТАБ в концентрациях 0,005; 0,05 и 1 г/л.

Наблюдаемые нами закономерности выхода электролитов и бетацианина в наружный раствор под воздействием ДСН прослеживаются и в экспериментах с ЦТАБ. Но при этом было обнаружено, что ЦТАБ в большей мере влияет на проницаемость клеточных мембран, чем ДСН в равных концентрациях. Так, показатели удельной электропроводности и оптической плотности в образцах ЦТАБ в концентрации 1 г/л достигали через 120 мин эксперимента в среднем значений 81 мкСм/см и 1,72 D соответственно, что в сравнении с контролем (21,8 мкСм/см и 0,19 D) выше на 272 и 805% соответственно. Это почти вдвое больше значений удельной электропроводности и оптической плотности раствора с ДСН в аналогичной концентрации. Так, если в случае с ДСН концентрация 0,05 г/л оказалась недействующей, то ЦТАБ в этой же концентрации нарушал барьерные свойства поверхностных структур тканей корнеплодов. Об этом свидетельствовало увеличение выхода электролитов и бетацианина по сравнению с контролем. В концентрации 0,005 г/л ЦТАБ значения удельной электропроводности и оптической плотности оставались на уровне контроля. Следовательно, ЦТАБ в концентрации 0,005 г/л не влиял на проницаемость мембран.

Таким образом, для ЦТАБ недействующими на мембраны клеток и вакуолей свеклы концентрациями были <0,005 г/л, а действующими – свыше 1 г/л.

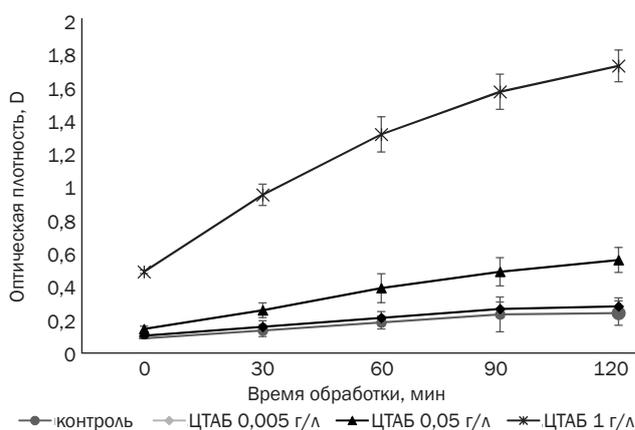


Рис. 4. Динамика выхода бетацианинов из ткани корнеплодов *Beta vulgaris* L. после воздействия растворов цетилтриметиламмония бромид в концентрациях 0,005; 0,05 и 1 г/л

Fig. 4. Dynamics of the release of betacyanins from the *Beta vulgaris* L. roots after exposure to CTAB solutions at concentrations of 0.005; 0.05 and 1 g/l

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Индикаторами изменения проницаемости корнеплодов свеклы могут служить выходы электролитов и красящих пигментов бетацианинов из клеток, определяемые кондуктометрическим и спектрофотометрическим методами соответственно.

Приведенные выше результаты экспериментов показывают, что при воздействии таких ПАВ, как анионоактивный ДСН и катионоактивный ЦТАБ, на ткань корнеплодов столовой свеклы *Beta vulgaris* L. сорта Бордо существенно увеличивался выход электролитов и бетацианина, что говорит об увеличении проницаемости клеточных мембран. Через 2 ч эксперимента выход электролитов из клеток корнеплодов после воздействия растворами 1 г/л ДСН и ЦТАБ составлял 42 и 81 мкСм/см соответственно, что на 89 и 272% выше значений контроля. В то же время выход бетацианинов составил 0,94 и 1,72 D соответственно, что на 327 и 805% выше значений контроля. При этом прослеживалась хорошая концентрационная зависимость: чем больше было содержание изучаемых детергентов, тем выше значения удельной электропроводности и оптической плотности инкубационных растворов.

В отношении степени воздействия на клеточные

мембраны для ДСН были найдены следующие концентрации: сильнодействующая – 1 г/л; ингибирующая – 0,5 г/л; недействующая – 0,05 г/л. Для ЦТАБ сильнодействующая концентрация составила 1 г/л; ингибирующая – 0,05 г/л; недействующая – 0,005 г/л. Следовательно, ЦТАБ обладает более сильным повреждающим действием на мембраны клеток столовой свеклы, чем ДСН.

Таким образом, результаты, полученные кондуктометрическим и спектрофотометрическим методами, показали увеличение выхода электролитов и бетацианина в раствор из тканей корнеплода при повышении концентрации ДСН и ЦТАБ в ответ на воздействие испытанных ПАВ. Это, в свою очередь, свидетельствует о значительных нарушениях поверхностных структур клеток тканей и о нарушении барьерных свойств мембран.

Испытанные методы зарекомендовали себя как быстрые и эффективные, они могут быть рекомендованы для экспрессной оценки интенсивности влияния ПАВ на растительные организмы, для изучения мембранотропного действия веществ, для контроля при селекции сельскохозяйственных культур растений на устойчивость к неблагоприятным условиям.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Niraula T.P., Bhattarai A., Chatterjee S.K. Sodium dodecyl sulphate: a very useful surfactant for scientific investigations // Journal of Innovation and Knowledge. 2014. Vol. 2, no. 1. P. 111–113.
2. Kagalwala A.Y., Kavitha K. Effects of surfactant (sodium lauryl sulphate) on *Hydrilla verticillata* // International Journal of Life Sciences Biotechnology and Pharma Research. 2012. Vol. 1, no. 2. P. 128–138.
3. Yadav S.N., Rai S., Shah P., Roy N., Bhattarai A. Spectrophotometric and conductometric studies on the interaction of surfactant with polyelectrolyte in the presence of dye in aqueous medium // Journal of Molecular Liquids. 2022. Vol. 355. P. 118949. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118949>.
4. Li Y., Lee J.-S. Staring at protein–surfactant interactions: fundamental approaches and comparative evaluation of their combinations: a review // Analytica Chimica Acta. 2019. Vol. 1063. P. 18–39. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.02.024>.
5. Bondi C.A.M., Marks J.L., Wroblewski L.B., Raatikainen H.S., Lenox S.R., Gebhardt K.E. Human and environmental toxicity of sodium lauryl sulfate (SLS): evidence for safe use in household cleaning products // Environmental Health Insights. 2015. Vol. 9. P. 27–32. <https://doi.org/10.4137/EHI.S31765>.
6. Rauniyar B.S., Bhattarai A. Study of conductivity, contact angle and surface free energy of anionic (SDS, AOT) and cationic (CTAB) surfactants in water and isopropanol mixture // Journal of Molecular Liquids. 2021. Vol. 323, no. 4. P. 114604. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114604>.
7. Genisel M., Eren O. Evaluation of physiological and biochemical aberration linked to effect of sodium dodecyl sulphate on barley seedlings // SN Applied Sciences. 2020. Vol. 2. Article number: 514. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2289-z>.
8. Saksonov M.N., Stom D.I., Kupchinsky A.B. Combined action of sodium dodecyl sulphate, tween-85 and oil on duckweed (*Lemna minor*) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 720. P. 012051. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/720/1/012051>.
9. Pang S., Willis L. Final report on the safety assessment of cetrimonium chloride, cetrimonium bromide, and stearyltrimonium chloride // International Journal of Toxicology. 1997. Vol. 16, no. 3. P. 195–220.
10. Lai Y.S., Zhou Y., Eustance E., Straka L., Wang Z., Rittmann B.E. Cell disruption by cationic surfactants affects bioproduct recovery from *Synechocystis* sp. PCC 6803 // Algal Research. 2018. Vol. 34, no. 12. P. 250–255. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.08.010>.
11. Юрков А.П., Крюков А.А., Горбунова А.О., Кожемяков А.П., Степанова Г.В., Мачс Э.М. [и др.]. Молекулярно-генетическая идентификация грибов арбускулярной микоризы // Экологическая генетика. 2018. Т. 16. N 2. С. 11–23. <https://doi.org/10.17816/ecogen16211-23>.
12. Allen G.C., Flores-Vergara M.A., Krasynanski S., Kumar S., Thompson W.F. A modified protocol for rapid DNA isolation from plant tissues using cetyltrimethylammonium bromide // Nature Protocols. 2006. Vol. 1, no. 5. P. 2320–2325. <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.384>.
13. Tsagaropoulou G., Allen F.J., Clarke S.M., Camp P.J. Self-assembly and adsorption of cetyltrimethylammonium bromide and didodecyltrimethylammonium bromide surfactants at the mica–water interface // Soft Matter. 2019. Vol. 15, no. 41. P. 8402–8411. <https://doi.org/10.1039/C9SM01464K>.
14. Aquirre-Ramirez M., Silva-Jimenez H., Banat I.M., Diaz De Rienzo M.A. Surfactants: physicochemical interactions with biological macromolecules // Biotechnology Letters. 2021. Vol. 43. P. 523–535. <https://doi.org/10.1007/s10287-021-04444-4>.

doi.org/10.1007/s10529-020-03054-1.

15. Грищенкова Н.Н., Лукаткин А.С. Определение устойчивости растительных тканей к абiotическим стрессам с использованием кондуктометрического метода // Поволжский экологический журнал. 2005. N 1. С. 3–11.

16. Приходько Н.В. Изменение проницаемости клеточных мембран как общее звено механизмов неспецифической реакции растений на внешние воздействия // Физиология и биохимия культурных растений. 1977. Т. 9. N 3. С. 301–309.

17. Kolesnikova E.V., Ozolina N.V., Nurminsky V.N., Nesterkina I.S., Sitneva L.A., Lapteva T.I. Evaluation of the effect of oxidative stress on roots of red beet (*Beta vulgaris* L.) // Journal of Stress Physiology & Biochemistry. 2014. Vol. 10, no. 4. P. 5–12.

18. Hatsugai N., Katagiri F. Quantification of plant cell death by electrolyte leakage assay // Bio-protocol. 2018. Vol. 8, no. 5. P. 1–7. <https://doi.org/10.21769/BioProtoc.2758>.

19. Azeredo H.M.C. Betalains: properties, sourc-

es, applications, and stability – a review // International Journal of Food Science and Technology. 2009. Vol. 44, no. 12. P. 2365–2376. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01668.x>.

20. Sadowska-Bartosz I., Bartosz G. Biological properties and applications of betalains // Molecules. 2021. Vol. 26, no. 9. P. 2520. <https://doi.org/10.3390/molecules26092520>.

21. Саенко И.И., Тарасенко О.В., Дейнека В.И., Дейнека Л.А. Бетацанины корнеплодов красной столовой свеклы // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2012. Т. 18. N 3. С. 194–200.

22. Кожемяко А.В., Сергеева И.Ю., Долголюк И.В. Экспериментальное определение биологически активных соединений в выжимках свеклы и моркови, районированных в Сибирском регионе // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. N 1. С. 179–187. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-179-187>.

REFERENCES

1. Niraula T.P., Bhattarai A., Chatterjee S.K. Sodium dodecyl sulphate: a very useful surfactant for scientific investigations. *Journal of Innovation and Knowledge*. 2014;2(1):111-113.

2. Kagalwala A.Y., Kavitha K. Effects of surfactant (sodium lauryl sulphate) on *Hydrilla verticillata*. *International Journal of Life Sciences Biotechnology and Pharma Research*. 2012;1(2):128-138.

3. Yadav S.N., Rai S., Shah P., Roy N., Bhattarai A. Spectrophotometric and conductometric studies on the interaction of surfactant with polyelectrolyte in the presence of dye in aqueous medium. *Journal of Molecular Liquids*. 2022;355:118949. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.118949>.

4. Li Y., Lee J.-S. Staring at protein–surfactant interactions: fundamental approaches and comparative evaluation of their combinations: a review. *Analytica Chimica Acta*. 2019;1063:18-39. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.02.024>.

5. Bondi C.A.M., Marks J.L., Wroblewski L.B., Raatikainen H.S., Lenox S.R., Gebhardt K.E. Human and environmental toxicity of sodium lauryl sulfate (SLS): evidence for safe use in household cleaning products. *Environmental Health Insights*. 2015;9:27-32. <https://doi.org/10.4137/EHI.S31765>.

6. Rauniyar B.S., Bhattarai A. Study of conductivity, contact angle and surface free energy of anionic (SDS, AOT) and cationic (CTAB) surfactants in water and isopropanol mixture. *Journal of Molecular Liquids*. 2021;323(4):114604. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114604>.

7. Genisel M., Eren O. Evaluation of physiological and biochemical aberration linked to effect of sodium dodecyl sulphate on barley seedlings. *SN Applied Sciences*. 2020;2. Article number: 514. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2289-z>.

8. Saksonov M.N., Stom D.I., Kupchinsky A.B. Combined action of sodium dodecyl sulphate, tween-85 and oil on duckweed (*Lemna minor*). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;720:012051. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/720/1/012051>.

9. Pang S., Willis L. Final report on the safety assess-

ment of cetrimonium chloride, cetrimonium bromide, and stearyltrimonium chloride. *International Journal of Toxicology*. 1997;16(3):195-220.

10. Lai Y.S., Zhou Y., Eustance E., Straka L., Wang Z., Rittmann B.E. Cell disruption by cationic surfactants affects bioproduct recovery from *Synechocystis* sp. PCC 6803. *Algal Research*. 2018;34(12):250-255. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.08.010>.

11. Yurkov A.P., Kryukov A.A., Gorbunova A.O., Kojemyakov A.P., Stepanova G.V., Machs E.M., et al. Molecular genetic identification of arbuscular mycorrhizal fungi. *Jekologicheskaja genetika = Ecological genetics*. 2018;16(2):11-23. (In Russian). <https://doi.org/10.17816/ecogen16211-23>.

12. Allen G.C., Flores-Vergara M.A., Krasynanski S., Kumar S., Thompson W.F. A modified protocol for rapid DNA isolation from plant tissues using cetyltrimethylammonium bromide. *Nature Protocols*. 2006;1(5):2320-2325. <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.384>.

13. Tsagkaropoulou G., Allen F.J., Clarke S.M., Camp P.J. Self-assembly and adsorption of cetyltrimethylammonium bromide and didodecyldimethylammonium bromide surfactants at the mica–water interface. *Soft Matter*. 2019;15(41):8402-8411. <https://doi.org/10.1039/C9SM01464K>.

14. Aquirre-Ramirez M., Silva-Jimenez H., Banat I.M., Diaz De Rienzo M.A. Surfactants: physicochemical interactions with biological macromolecules. *Biotechnology Letters*. 2021;43:523-535. <https://doi.org/10.1007/s10529-020-03054-1>.

15. Grishhenkova N.N., Lukatkin A.S. Determination of resistance of plant tissues to abiotic stresses using the conductometric method. *Povolzhskij jekologicheskij zhurnal = Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2005;(1):3-11. (In Russian).

16. Prihod'ko N.V. Changes in cell membrane permeability as a common link in the mechanisms of nonspecific plant responses to external influences. *Fiziologija i biohimija kul'turnyh rastenij*. 1977;9(3):301-309. (In Russian).

17. Kolesnikova E.V., Ozolina N.V., Nurminsky V.N., Nesterkina I.S., Sitneva L.A., Lapteva T.I. Evaluation of

the effect of oxidative stress on roots of red beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*. 2014;10(4):5-12.

18. Hatsugai N., Katagiri F. Quantification of plant cell death by electrolyte leakage assay. *Bio-protocol*. 2018;8(5):1-7. <https://doi.org/10.21769/BioProtoc.2758>.

19. Azeredo H.M.C. Betalains: properties, sources, applications, and stability – a review. *International Journal of Food Science and Technology*. 2009;44(12):2365-2376. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01668.x>.

20. Sadowska-Bartosz I., Bartosz G. Biological properties and applications of betalains. *Molecules*. 2021;26(9):2520.

<https://doi.org/10.3390/molecules26092520>.

21. Saenko I.I., Tarasenko O.V., Deineka V.I., Deineka L.A. Betacyanins of red beetroot root. *Nauchnye ведомosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Estestvennye nauki*. 2012;18(3):194-200. (In Russian).

22. Kozhemayko A.V., Sergeeva I.Yu., Dolgolyuk I.V. Experimental determination of biologically active compounds in pomace of Siberian beet and carrot. *Tehnika i tehnologija pishhevyh proizvodstv = Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(1):179-187. (In Russian). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-179-187>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Крапивная Мария Владимировна,

магистр,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
✉ krapivnaya.m@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8674-8970>

Домрачева Валентина Андреевна,

д.т.н., профессор,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
domra@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-1727-621X>

Стом Дэвард Иосифович,

д.б.н., профессор,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация;
заведующий лабораторией водной токсикологии,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация;
главный научный сотрудник,
Байкальский музей СО РАН,
664520, п. Листвянка, ул. Академическая, 1,
Российская Федерация,
stomd@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9496-2961>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный
вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 04.05.2022.
Одобрена после рецензирования 10.12.2022.
Принята к публикации 28.02.2023.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mariya V. Krapivnaya,

Master,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
✉ krapivnaya.m@list.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8674-8970>

Valentina A. Domracheva,

Dr. Sci. (Engineering), Professor,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
domra@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-1727-621X>

Devard I. Stom,

Dr. Sci. (Biology), Professor,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation;
Head of the Laboratory of Water Toxicology,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation;
Chief Researcher,
Baikal Museum SB RAS,
1, Academicheskaya St., Listvyanka, 664520,
Russian Federation,
stomd@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9496-2961>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding
the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all
the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 04.05.2022.
Approved after reviewing 10.12.2022.
Accepted for publication 28.02.2023.