

ISSN 0868-854 (Print)

ISSN 2413-5984 (Online). *Algologia*. 2017, 27(4): 382–402

doi: 10.15407/alg27.04.382

УДК 582.263

ЦАРЕНКО П.М.¹, КОНИЩУК М.А.¹, КОРХОВОЙ В.И.²,
КОСТИКОВ И.Ю.³, БЛЮМ Я.Б.²

¹Институт ботаники им. Н.Г. Холодного НАН Украины,
ул. Терещенковская, 2, Киев 01004, Украина

²ГО Институт пищевой биотехнологии и геномики НАН Украины,
ул. Осиповского, 2А, Киев 04123, Украина

³УНЦ «Институт биологии и медицины» Киевского национального ун-та
имени Тараса Шевченко,
просп. Акад. Глушкова, 2, Киев 03127, Украина

ЖИРНОКИСЛОТНЫЙ СОСТАВ КОККОИДНЫХ ЗЕЛЕННЫХ ВОДОРОСЛЕЙ КАК ОСНОВА ИХ ЭНЕРГОСЫРЬЕВОГО ПОТЕНЦИАЛА. 1. *CHLORELLA*- И *ACUTODESMUS*-ПОДОБНЫЕ МИКРОВОДОРОСЛИ (*CHLOROPHYTA*)

Приведен анализ биопродукционных параметров *Chlorella*- и *Acutodesmus*-подобных водорослей из коллекции IBASU-A Института ботаники им. Н.Г. Холодного НАН Украины, проанализированы характерные особенности их роста и показатели продуктивности, выявлена штаммовая специфика видов *Chlorella vulgaris* Beij. и *Acutodesmus dimorphus* (Turpin) P. Tsarenko как объектов промышленного культивирования, установлены особенности их жирнокислотного состава (ЖКС) в стандартных условиях лабораторного культивирования, а также таксономическая (родовая) специфика ведущего комплекса ЖКС. Обнаружена вариабельность общего содержания липидов у представителей исследованных родов, а также потенциальное возрастание в 1,5 раза количества липидов или фракционного количества отдельных жирных кислот в период стационарной фазы роста культуры под действием стрессовых факторов (дефицита азота).

Ключевые слова: водоросли, *Chlorella*, *Acutodesmus*, липиды, жирнокислотный состав, биоэнергетика

Введение

В настоящее время микроводоросли рассматриваются как продуценты биодизеля третьего/четвертого поколения. В их числе и представители родов *Chlorella* s. l. (incl. *Chloroidium* Nadson, *Chlorella* Beij., *Parachlorella* Krienitz et al., *Planktochlorella* Škaloud et Němcová, *Pseudochlorella* P.W.G. Lund, *Zoochlorella* Brandt) и *Acutodesmus* s. l. (incl. *Acutodesmus* (Turpin) P. Tsarenko, *Scenedesmus* Meyen (подрод *Acutodesmus*), *Tetrademus* G.M. Sm.)

© Царенко П.М., Конищук М.А., Корховой В.И., Костиков И.Ю., Блюм Я.Б., 2017

из зеленых коккоидных микроводорослей, отдельные виды и штаммы которых используются в биотехнологических разработках или относятся к потенциальным объектам биосырья для производства биодизеля (Перспективы..., 2008; Chisti, 2007; Gouveia, 2011; Borowitzka, 2013; Barbosa, Wiffels, 2013; Chaudhary et al., 2014). Микроводоросли, особенно гиперпродуценты липидов, перспективны в энергоконверсионных разработках как важные составляющие компонента для производства биодизеля (Чернова и др., 2008, 2014; Корховой, Блюм, 2015; Chisti, 2007; Amin, 2009; Brennan, Owende, 2010; Gouveia, 2011; Yang et al., 2011; Richardson et al., 2012; Korkhovoy et al., 2016). Если с 1 га посевов сои или плантации масличной пальмы производится, соответственно, 446 л или 5960 л масла, то с такой же площади водной поверхности с массовым развитием водорослей можно получить около 59000–136900 л при содержании 30–70% масла в их биомассе (Chisti, 2007). Очень высоким (23,2%) является энергетический потенциал водорослей. Он соизмерим с аналогичным для отходов растениеводства (26,6%) и энергетических культур (20,2%) (Navrysh, 2011). Хлореллоидные (одноклеточные) и акутусоидные (сценедесмоидные – ценобиальные) представители водорослей также характеризуются высокой продуктивностью (до 120 т/г/м²), стабильным ростом, устойчивостью к контаминации и соответствуют критериям объектов промышленного культивирования с повышенным содержанием липидов. А отдельные виды, например *Chlorella vulgaris*, являются признанными объектами разносторонних научных и прикладных биотехнологических исследований (Цоглин и др., 1999; Safi et al., 2014; Škaloud et al., 2014; Krienitz et al., 2015). Отдельные штаммы видов рассматриваемых родов являются патентованными объектами с высокими продукционными показателями и способностью к лабильности физиолого-биохимического состава или ценных органических веществ (Владиминова, Семенов, 1962; Цоглин, Семенов, 1979; Цоглин, Пронина, 2012; Царенко, 2014; Tamiya, 1959; Škaloud et al., 2014; Sri-uam et al., 2014; Michalak, Chojnacka, 2015).

Chlorella vulgaris, *Acutodesmus (Scenedesmus) obliquus* (Kütz.) P. Tsarenko, *A. dimorphus* (Turpin) P. Tsarenko (= *Scenedesmus acutus* Meyen) и др. являются перспективными биотехнологическими видами-продуцентами биомассы, экзометаболитов и общих липидов – необходимого компонента энергоресурсного материала (Чернова и др., 2008; Царенко та ін., 2011, 2012; Царенко, Борисова, 2014; Кирпенко и др., 2015а, б, 2016а, б; Корховой, Блюм, 2015; Spolaore et al., 2006; Chisti, 2007; Gouveia, 2011; Ramachandra et al., 2014; Tsarenko, Borisova, 2014; Baros et al., 2015; Zhu, 2015; Chantsungnoen, Chisti, 2016; Milano et al., 2016; Daliry et al., 2017). Наряду с этим, жирнокислотный состав (ЖКС) липидной фракции указанных видов имеет определенное сходство с таковым нефтяных углеводородов, а его энергоэффективность значительно выше, чем у других растительных объектов. Однако ее экономическая рентабельность в промышленных масштабах в настоящее время остается дискуссионной (Чернова, Киселева, 2014;

Chisti, 2007; Biodiesel..., 2011; Borowitzka, 2013; Liu, 2014; Saifullah et al., 2014; Chen et al., 2015). ЖКС водорослей характеризуется преобладанием пальмитиновой кислоты (16 : 0) среди насыщенных жирных кислот, а среди ненасыщенных – пальмито-олеиновой (16 : 1) и линоленовой (18 : 3) кислот. Известно, что ЖКС микроводорослей, а также общее содержание ненасыщенных жирных кислот, которое в их штаммах значительно выше, чем у пальмового масла (но меньше, чем у соевого), положительно влияют на качество биодизеля и его технические показатели (Перспективи..., 2008). В литературе приведены сведения о ЖКС конкретных штаммов *Ch. vulgaris* из разных фиколого-протистологических коллекций, а также вариабельности их качественных и количественных показателей в зависимости от состава среды, ее pH, температуры, интенсивности освещения и т.д. (Клячко-Гурвич и др., 1979а, б, 1980; Mitra et al., 2012; Liu et al., 2014). Однако широкая трактовка понятия вида указанных таксонов из родов *Chlorella* s. l. и *Scenedesmus* s. l., многочисленность и разнородность штаммов этих видов в фикологических коллекциях требуют дальнейшего поиска новых штаммов с высокими биотехнологическими показателями и исследования их ростовых, ресурсо-продукционных и физиолого-биохимических характеристик.

Цель нашего исследования – изучить особенности ЖКС потенциальных видов-продуцентов биомассы из родов *Chlorella* s. l. и *Acutodesmus* s. l. в стандартных условиях лабораторной культуры и под влиянием стрессовых факторов (дефицит азота); выявить специфику роста и накопления липидов штаммами *Chlorella vulgaris* и *Acutodesmus dimorphus* из коллекции микроводорослей IBASU-A как потенциальных объектов промышленного культивирования.

Материалы и методы

Объектом исследований служили культуры из коллекции микроводорослей IBASU-A Института ботаники им. Н.Г. Холодного НАН Украины (Borisova, Tsarenko, 2004), среди которых 33 штамма перспективных продуцентов биомассы (Tsarenko et al., 2016) из родов *Acutodesmus* и *Chlorella* (incl. *Parachlorella*). Известно, что эти штаммы способны накапливать повышенное количество липидов, они устойчивы к контаминации и характеризуются активным ростом в культуре (Spolaore et al., 2006; Chisti, 2007; Gouveia, 2011). Штаммы микроводорослей в коллекции сохраняли на жидких (альгологически чистые культуры) и агаризованных (аксенические культуры) средах Тамия (Tamiya, 1959) и Буррелли (Soeder, Hegewald, 1988).

Для исследования выбраны 7 штаммов водорослей – перспективных продуцентов биомассы: *Acutodesmus dimorphus* (Turpin) P. Tsarenko IBASU-A шт. 251, 254 и 344, *Chlorella vulgaris* IBASU-A шт. 189 и 190, а также (= *Ch. saccharophilum* W. Krüger) *Chloroidium saccharophilum* (W. Krüger) Darienko IBASU-A шт. 187 и (= *Chlorella kessleri* Fott et Novák.) *Parachlorella kessleri* (Fott et Novák.) Krienitz et al. IBASU-A шт. 444.

Штаммы выращивали по единой схеме в конических колбах объемом 250, 500 и 1000 мл в стационарных условиях люминостата при температуре 28–30 °С и освещенности $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Культивирование в условиях экстенсивной культуры продолжалось 4–6 недель с чередованием световой и темновой фаз 16 : 8 ч. В условиях лабораторного миникультиватора, при интенсивном культивировании и постоянном барботировании воздушной смесью режим круглосуточной освещенности поддерживался в течение 7–10 дней. Исходная плотность посевного материала составляла 5 млн кл./ мл. Прирост биомассы оценивали прямым подсчетом количества клеток в камере Горяева на 7-, 14- и 21-е сутки и/или определением абсолютно сухого вещества (а. с. в.) методом прямого взвешивания (Методы..., 1975). Стрессовым фактором в проведенных исследованиях было ограниченное количество азота в питательной среде в период стационарной фазы роста, т.е. использовали безазотистую среду на 6–7-е сутки активного культивирования (Клячко-Гурвич, Семененко, 1966).

Интенсивность роста и прирост биомассы исследованных штаммов водорослей (*Ch. vulgaris*, *P. kessleri*, *A. dimorphus*) сравнивали с характеристиками контрольных высокопродуктивных штаммов биомассы *Ch. vulgaris* CALU-246 (= *Chlorella* sp k) (Цоглин и др., 1999) и *A. dimorphus* IBASU-A шт. 254 (YA-10-2) – известными продуцентами биомассы, используемыми в промышленном культивировании (Музафаров, Таубаев, 1984), а удельную скорость роста (μ) и продуктивность (P) рассчитывали по установленным показателям (Тренкеншу, 2005). Удельную скорость роста в зоне экспоненциальной фазы определяли по формуле:

$$\mu = \mu_m ; \quad \mu_m = \frac{\ln n - \ln n_0}{t - t_0},$$

где n и n_0 – концентрация клеток водорослей в момент времени t .

Линейный рост культуры определяли по формуле:

$$\mu = \frac{P_m}{B},$$

где P_m – продуктивность культуры; B – концентрация клеток.

Рост культуры в фазе замедленного роста определяли по формуле:

$$\mu = \frac{P_m}{B} \cdot \frac{B_m - B}{B_m - B^l},$$

где B_m – максимальная протность культуры; B^l – плотность культуры в конце фазы линейного роста.

Продуктивность культуры вычисляли по формулам:

– на фазе логарифмического роста:

$$P = \mu_t \cdot n_t,$$

где μ_t – удельная скорость роста; n_t – средняя концентрация клеток в момент времени t ;

– на фазе линейного роста:

$$P = P_m; \quad P_m = \frac{B - B_l}{t - t_l};$$

– на фазе замедленного роста:

$$P = \mu_r \cdot (B_m - B); \quad \mu_r = \frac{P_m}{B_m - B_l}.$$

Активно продуцирующие формы водорослей среди культур коллекции IBASU-A определяли с помощью экспресс-метода по наиболее выраженному накоплению биомассы (Algal..., 2005).

Липиды экстрагировали из навески 1 г лиофильно высушенной биомассы водорослей на холоде изопропанолом, затем – смесью изопропанол-хлороформ (1 : 1) и дважды смесью хлороформ-метанол (1 : 1) (Новицкая и др., 1990; Harris, James 1969). Количество жирных кислот в суммарной фракции липидов определяли с помощью газожидкостной хроматографии в виде метиловых эфиров (ДСТУ ISO 5508-2001).

Анализ метиловых эфиров жирных кислот осуществляли методом газожидкостной хроматографии на газовом хроматографе GS-16A Shimadzu (Япония) с возможностью программирования температуры до 330 °С, используя пламенно-ионизационный детектор и программное обеспечение GS solution. Для разделения применяли капиллярную колонку THERMO TR-FAME (30 mm × 0,25 mm ID × 0,25 mm film) с температурным градиентом от 70 до 230 °С. Неподвижная фаза – 70% Суанорпропил (equiv) Polysiphenylene-siloxane, подвижная фаза – гелий со скоростью потока газа 1 мл/мин. Температура инжектора и детектора составляла 280 и 260 °С соответственно. Содержание жирных кислот выражали в процентах общей суммы. Идентификацию жирных кислот проводили, сравнивая время удерживания определенных соединений со временем удерживания стандартных жирных кислот.

Индекс ненасыщенных жирных кислот вычисляли по известной формуле (Киселева, 2008):

$$\text{ИН} = \frac{\sum \% C_{n:1} + (\sum \% C_{n:2}) \times 2 + (\sum \% C_{n:3}) \times 3}{100\%}$$

Результаты и обсуждение

Кинетика показателей роста

Сравнительное исследование параметров роста и определение кинетических характеристик *Ch. vulgaris* (IBASU-A шт. 189, 190), *Chloroidium saccharophilum* (W. Krüger) Darienko et al. (IBASU-A шт. 186), *Parachlorella kessleri* (Fott et Novák.) Krienitz et al. (IBASU-A шт. 444) и *Acutodesmus dimorphus* (Turpin) P. Tsarenko (IBASU-A шт. 251, 254) показали, что большинство исследованных штаммов зеленых коккоидных водорослей хорошо растут и развиваются при заданных условиях культивирования и оптимальном содержании азота в

питательной среде Тамийя в объеме 500 мг/л KNO_3 , а штаммы акутусоидных водорослей – в среде Буррелли в объеме 200 мг/л KNO_3 (Царенко та ін., 2011, 2012; Tsarenko et al., 2016). При интенсивном режиме выращивания в накопительной культуре кривые роста всех исследованных штаммов имеют S-образный характер (рис. 1, а) и в течение 10 сут проходят практически все фазы роста: начальную, или лаг-фазу, логарифмическую, линейную, фазу замедленного роста и стационарную (Тренкеншу, 2005), за исключением последней (фазы отмирания). Они характеризуются укороченными сроками адаптации к условиям культуры, высокой скоростью роста и продуктивностью (рис. 1, а–в). В культурах видов родов *Chlorella*, *Chloroidium* и *Parachlorella* максимальная численность клеток (В) равна 38–250 млн кл./мл, удельная скорость роста (μ) и продуктивность (Р) – 0,55–1,4 сут⁻¹ и 9,5–72,5 млн кл./мл·сут. Наиболее активный рост отмечен в культуре *Ch. vulgaris* IBASU-A шт. 189 (Tsarenko et al., 2016). Лаг-фаза составляла менее 2 сут, после чего переходила в экспоненциальную и линейную фазу роста. Стационарная фаза роста наступала на 6-е сутки. Удельная скорость роста была 1,4 сут⁻¹, продуктивность – 72,5 млн кл./мл·сут (рис. 1, а–в). Интенсивный рост отмечен также для пигментных мутантов этого штамма (шт. 190, 192, 236), из которых *Ch. vulgaris* IBASU-A шт. 190 характеризовался $\mu = 0,7$ сут⁻¹, Р = 24,5 млн кл./мл·сут и В = 124 млн/мл.

Показатели максимальной численности клеток и продуктивности в культурах *P. kessleri* IBASU-A шт. 444 и *Ch. saccharophylla* IBASU-A шт. 187 были ниже, чем у *Ch. vulgaris* IBASU-A шт. 189; также следует учитывать разницу в размерах клеток этих видов. В частности, в период экспоненциальной фазы роста диаметр клеток у *P. kessleri* IBASU-A шт. 444 составлял 5,27 мкм, у *Ch. vulgaris* IBASU-A шт. 189 – 3,58 мкм, а у *Ch. saccharophylla* IBASU-A шт. 187 ширина клеток составляла в среднем 4,66 мкм, длина – 6,51 мкм ($n = 100$). Таким образом, клетки *Ch. vulgaris* IBASU-A шт. 189 были в 2 раза меньше по сравнению с таковыми других видов зеленых водорослей.

В культурах *Scenedesmus*-подобных водорослей рода *Acutodesmus* (которые нередко проходят в культуре хлореллоидные стадии развития или полностью переходят в одноклеточное состояние) максимальное количество клеток несколько ниже – 35–39 млн кл./мл, а удельная скорость роста (μ) и продуктивность (Р) составляют, соответственно, 0,32–0,46 сут⁻¹ и 6,4–9,2 млн кл./мл·сут (рис. 1, в). При этом прирост биомассы в культурах водорослей рода *Chlorella*, *Chloroidium* и *Parachlorella* изменяется в пределах 0,51–1,6 г/л а. с. в. в сутки, а в культурах штаммов *Acutodesmus* – от 0,34 до 1,2 г/л (рис. 2).

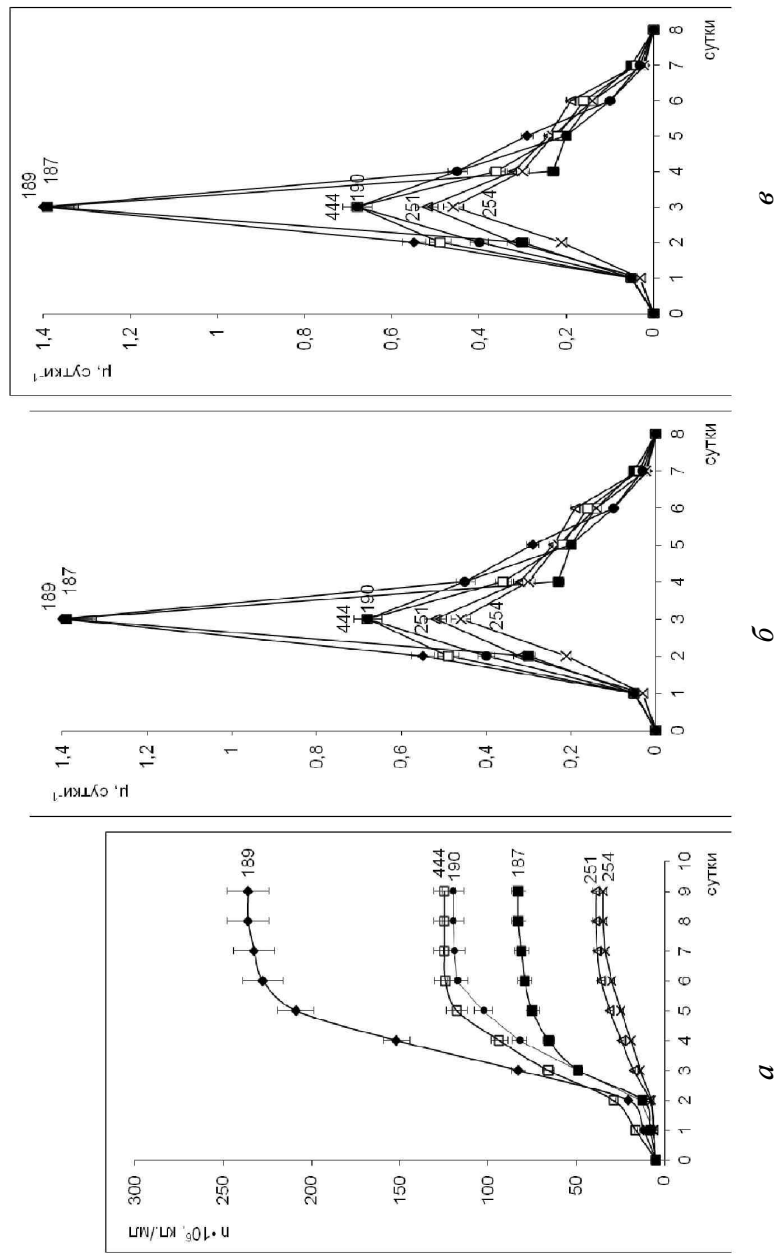


Рис. 1. Характеристика роста водорослей: а – кривая роста водорослей, б – удельная скорость роста, в – продуктивность. ♦ – *Chlorella vulgaris* шт. 189, ● – *Ch. vulgaris* шт. 190, Δ – *Acutodesmus dimorphus* шт. 251, × – *A. dimorphus* шт. 254, ■ – *Chlorooidium saccharophilum* шт. 187, □ – *Parachlorella kessleri* шт. 444

Содержание жирных кислот (%) у некоторых штаммов водорослей из родов *Chlorella*, *Parachlorella* и *Acutodesmus*

Штамм	C6:0	C10:0	C12:0	C14:0	C15:0	C16:0	C16:1	C16:3	C17:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	C20:0	C20:1	C22:0	C22:1	НЖК	МНЖК	Сумма общих липидов, %
<i>Ch. vulgaris</i> IBASU-189	–	–	0,23	0,27	–	11,95	2,58	9,28	3,80	2,05	11,27	17,35	21,20	10,0	–	1,32	0,41	29,62	62,09	17,5±1,2
<i>Ch. vulgaris</i> IBASU-189 (пять сред)	–	–	0,24	–	0,16	21,49	8,84	–	4,44	3,03	9,8	24,22	20,92	0,09	0,11	0,20	–	29,65	66,75	–
<i>Ch. vulgaris</i> IBASU-190	–	–	–	0,70	0,58	18,94	1,69	3,46	–	0,91	–	26,82	26,48	–	–	–	–	21,7	69,9	16,9±0,7
<i>P. kessleri</i> IBASU-444	–	0,36	1,78	1,45	0,50	16,32	0,78	3,43	5,54	1,80	7,63	26,38	22,80	0,70	0,50	–	–	28,48	61,52	10,53±0,5
<i>A. dimorphus</i> IBASU- 251	1,19	–	–	–	–	11,41	0,96	4,12	1,69	4,06	21,80	9,31	6,72	3,82	1,53	1,32	3,2	21,94	43,09	13,9±2,5
<i>A. dimorphus</i> IBASU-251 6/3 N	1,19	–	–	–	–	23,28	2,02	–	1,72	7,33	30,39	14,87	–	1,80	7,91	3,51	–	38,82	55,19	19,8±2,4
<i>A. dimorphus</i> IBASU-344	–	–	–	–	–	12,41	–	1,41	–	3,87	20,96	8,72	8,26	1,82	1,99	–	13,64	18,10	46,26	12,4±3,8

Условные обозначения ЖК: С6:0 – капроновая; С10:0 – каприновая; С12:0 – лауриновая; С14:0 – миристиновая; С15:0 – пентадекановая; С16:0 – пальмитиновая; С16:1 – пальмитоолеиновая; С16:3 – тексадкатриеновая; С17:0 – маргаритиновая; С18:0 – стеариновая; С18:1 – олеиновая; С18:2 – линолевая; С18:3 – линоленовая; 20:0 – арахидиновая; 20:1 – эйкозеновая; 22:0 – бегеновая; 22:1 – эруковая; НЖК – насыщенные жирные кислоты; МНЖК – полиненасыщенные жирные кислоты – мононенасыщенные жирные кислоты. Полуожирным шрифтом выделены максимальные значения ЖК.

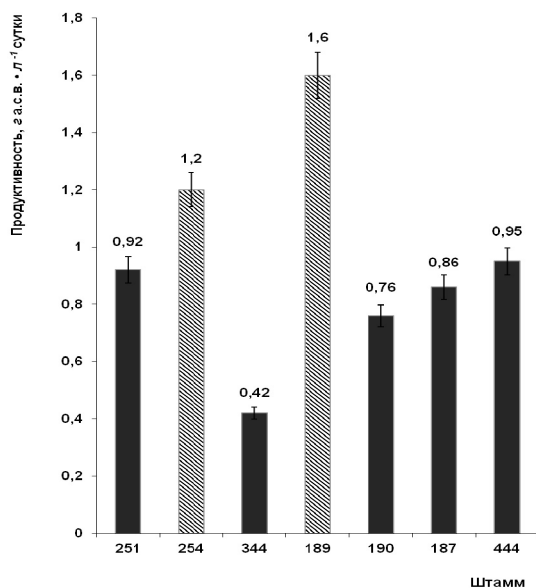


Рис. 2. Суммарные показатели прироста биомассы исследованных штаммов *Chlorella vulgaris* шт. 189 и *Acutodesmus dimorphus* шт. 254, контроль

Таким образом, по результатам исследования кинетических показателей роста перспективных штаммов водорослей из коллекции IBASU-A нами выявлены наиболее продуктивные штаммы: *Ch. vulgaris* IBASU-A 189 ($B = 250$ млн/мл, $\mu = 1,4$ сут⁻¹, $P = 72,5$ млн кл./мл·сут), *P. kessleri* IBASU-A 444 ($B = 123,4$ млн/мл, $\mu = 0,68$ сут⁻¹, $P = 24,3$ млн кл./мл·сут), *A. dimorphus* IBASU-A 251, 254 ($B = 35-39$ млн/мл, $\mu = 0,46-0,52$ сут⁻¹, $P = 6,4-9,2$ млн кл./мл·сут), которые использованы в дальнейших исследованиях количественного содержания липидов и качественного состава жирных кислот (см. таблицу).

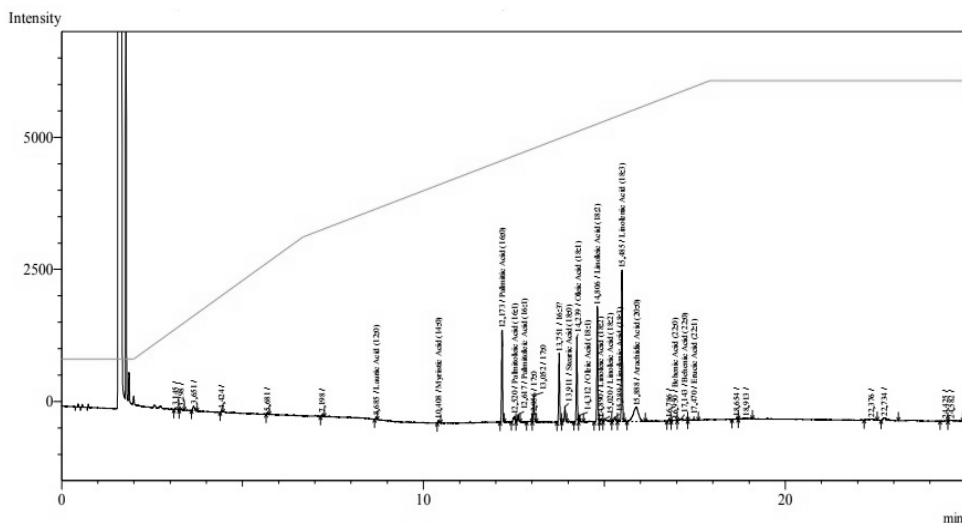


Рис. 3. Хроматограмма ЖКС *Chlorella vulgaris* IBASU-A 189

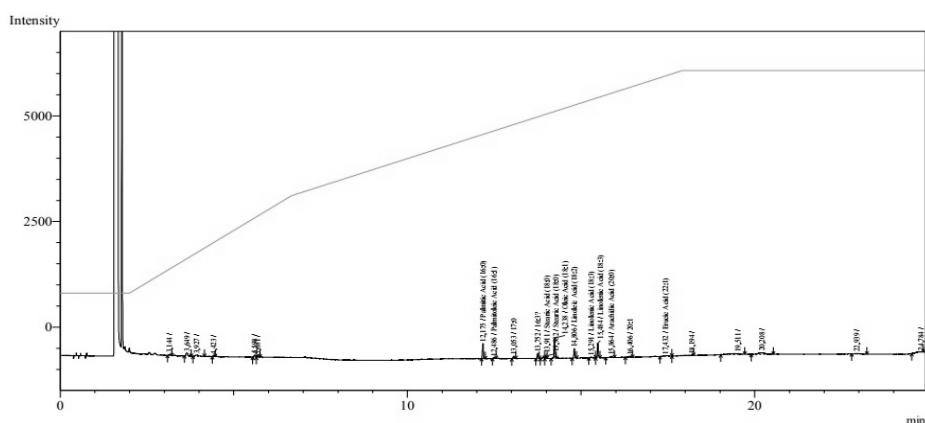


Рис. 4. Хроматограмма ЖКС *Acutodesmus dimorphus* IBASU-A 251

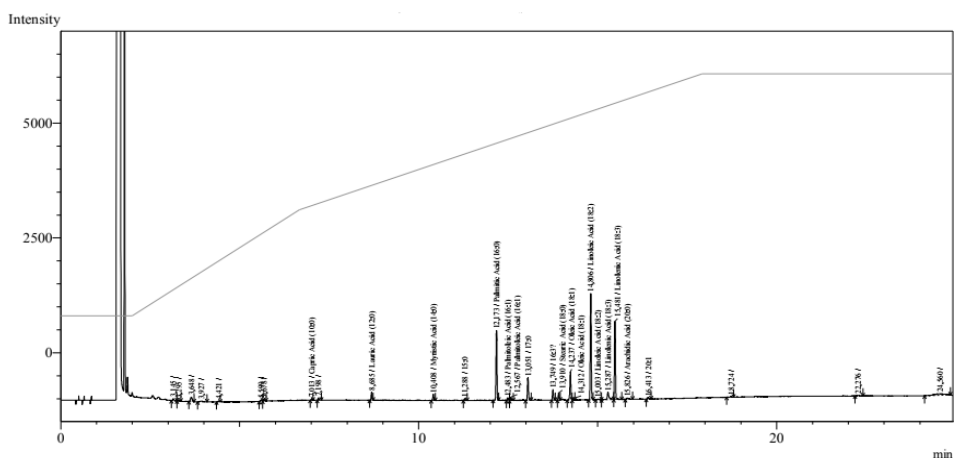


Рис. 5. Хроматограмма ЖКС *Parachlorella kessleri* IBASU-A 444

Жирнокислотный состав (ЖКС)

Количество общих липидов с учетом глико- и фосфолипидов, ди- и триацилглицеролов (ТАГ), свободных жирных кислот (ЖК) исследованных штаммов микроводорослей составляло 17,5% а. с. в. в условиях стационарной лабораторной культуры и 35,2% (*Acutodesmus dimorphus* шт. 251) в стрессовых условиях лабораторной культуры при дефиците азота в период стационарной фазы роста. Идентифицированные ЖК неполярных липидов можно объединить в группы основных (обычно 2–3, 10–30% общего количества) и второстепенных кислот (до 10%). В целом, в состав липидов исследованных штаммов зеленых коккоидных микроводорослей входят 17 жирных кислот (рис. 3–6): насыщенных (НЖК – лауриновая, миристиновая, пальмитиновая, стеариновая и др.) и ненасыщенных (полиненасыщенных (ПНЖК)/мононенасыщенных (МНЖК) – линолевая, линоленовая, олеиновая, пальмитолеиновая, миристоролеиновая, арахидоновая и др.).

Соотношение общего содержания этих двух групп ЖК колеблется в значительных пределах: 18,10–38,82% для НЖК и 34,13–69,90% для ПНЖК/МНЖК, при этом проявляется штаммовая и родовая специфика (см. таблицу, рис. 6).

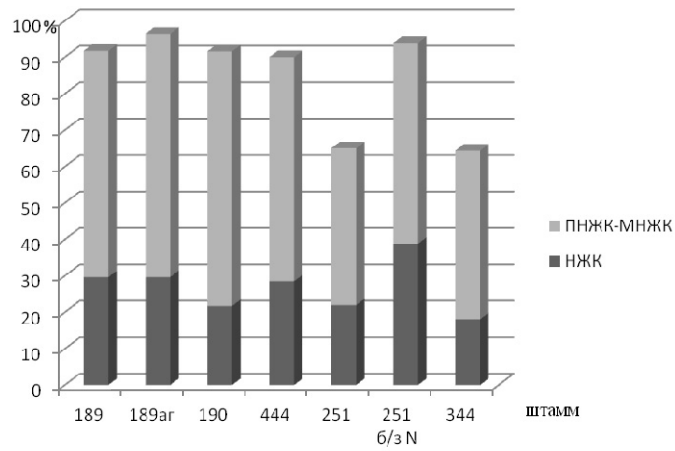


Рис. 6. Соотношение показателей НЖК и ПНЖК/МНЖК исследованных штаммов микроводорослей

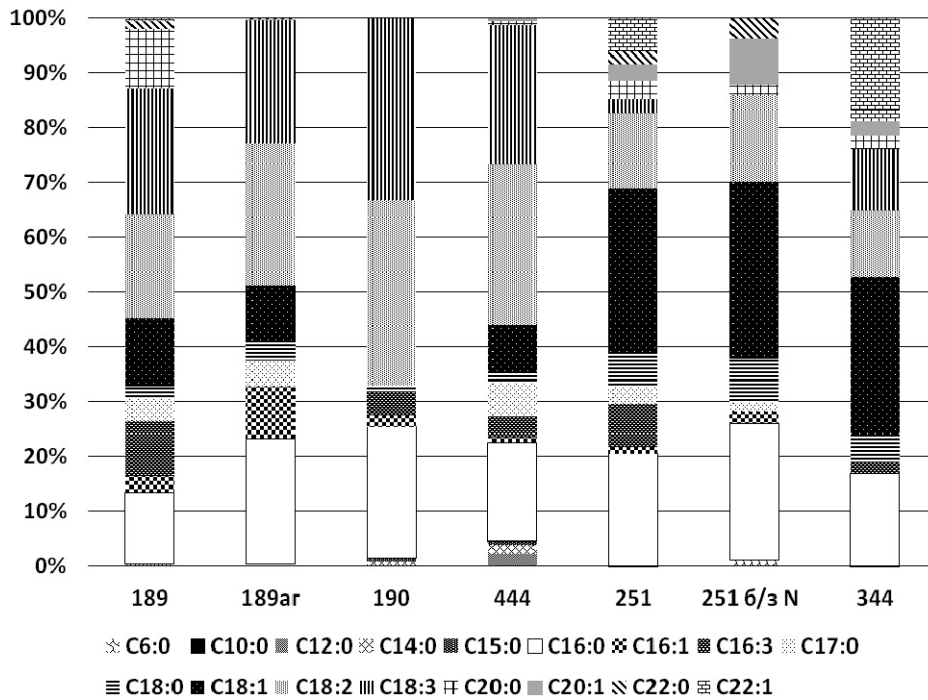


Рис. 7. Фракционный состав ЖК исследованных штаммов микроводорослей

Жирнокислотный состав исследованных водорослей в основной группе представлен ненасыщенными ЖК: линоленовой/линолевой (углеводородная цепь которых содержит по 18 атомов углерода — C18 : 2, 18 : 3) и пальмитиновой (C16 : 0) в разных модификациях в зависимости от таксона, условий культивирования и типа среды. Отмечена также штаммовая специфичность количественного состава ЖК и его зависимость от типа питательной среды для культивирования водорослей. Например, у штамма *Chlorella vulgaris* выявлена смена доминирующего комплекса ЖК с заменой основного доминанта линоленовой кислоты на линолевую (см. таблицу) при использовании для наращивания биомассы водорослей твердой агаризованной среды вместо жидкой. Тип питательной среды (жидкая-твердая) заметно влияет на количественные показатели ряда ЖК. В частности, отмечено 2–15-кратное изменение (увеличение/ снижение) содержания арахидиновой (C20 : 0), бегеновой (C22 : 0), пальмитоолеиновой (16 : 1) и пальмитиновой (16 : 0) кислот у *Ch. vulgaris* шт. 189 (см. таблицу). Аналогичные изменения ЖКС характерны для сравниваемых штаммов *Ch. vulgaris*, что подтверждает штаммовую зависимость (например, *Ch. vulgaris* шт. 189 и 190) от этого показателя.

Однако ведущий комплекс основных ЖК для вида в целом сохраняет константность при однотипных условиях культивирования. В частности, исследованные штаммы *Ch. vulgaris* характеризуются известным набором основных ЖК: линоленовая 18 : 3/линолевая 18 : 2 и пальмитиновая 16 : 0 (см. таблицу, рис. 7) (Клячко-Гурвич, Семененко, 1966). Аналогичный фракционный комплекс отмечен и для вида рода *Parachlorella* (морфологически сходного с предыдущим, но недавно таксономически отделенного от рода *Chlorella*), однако он отличается процентным содержанием указанных ЖК (см. таблицу, рис. 7). У *Ch. vulgaris* шт. 189 и *P. kessleri*, выращенных на жидкой среде Тамия, иное соотношение ЖК: у *Chlorella* доминирует линолевая, а в *Parachlorella* — линоленовая кислота (см. таблицу, рис. 7). В то же время, при выращивании водорослей на твердой агаризованной среде у *Ch. vulgaris* шт. 189 и мутантного шт. 190 (мутант по фотосинтетической системе) на жидкой среде отмечено изменение основного вида ЖК с линоленовой кислоты на линолевую, что отмечено и у *P. kessleri* шт. 444.

Фракционный состав ЖК штаммов *A. dimorphus* формируют олеиновая, пальмитиновая и линолевая кислоты. Для *A. dimorphus* IBASU-A шт. 344 выявлены высокие количественные показатели одной из длинноуглеродных кислот (C22 : 1) — эруковой (см. таблицу), что очевидно, является штаммовой спецификой и несвойственно другим исследованным нами штаммам разных видов коккоидных *Chlorophyta* (неопубл. данные). Отмечено также, что ЖКС в целом и количественные показатели отдельных кислот являются штаммоспецифичными. В частности, при сравнительном изучении штаммов 251 и 344 вида *A. dimorphus* выявлены различия в ЖКС по содержанию/отсутствию пальмитоолеиновой (C16 : 1), маргариновой (C17 : 0) и бегеновой

(C22 : 0) кислот, а также уменьшение количества гексадекатриеновой (C16 : 3) и арахидиновой (C20 : 0) ЖК. Кроме того, отмечено резкое (4-кратное) повышение количества эруковой кислоты (C22 : 1) и менее выраженное – линоленовой (C18 : 3) и пальмитиновой (16 : 0) (см. таблицу, рис. 7). При этом *A. dimorphus* шт. 251 демонстрировал постоянство состава основных компонентов ЖКС вне зависимости от условий культивирования и был способен значительно (в 1,5 раза) увеличивать их содержание в условиях стресса (дефицит азота в питательной среде). Нами отмечено 2–5-кратное повышение количества эйкозаеновой (C20 : 1), бегеновой (C22 : 0), линолевой (C18 : 2), стеариновой (C18 : 0), а также пальмитолеиновой (C16 : 1) и пальмитиновой (16 : 0) ЖК.

Влияние стрессовых факторов на накопление липидов клетками *Chlorella vulgaris* исследовано многими авторами (Клячко-Гурвич, Семененко, 1966; Дворецкий и др., 2015; Liang et al., 2009; Cheng, He, 2014; Namedy et al., 2016 и др.), в то время как сведения об аналогичном влиянии на липидопродуктивность *A. dimorphus* немногочисленны (Ho et al., 2010; Abomohra et al., 2013; Zhu, 2015; El-Sheekh et al., 2017).

Результаты наших исследований согласуются с данными других авторов о повышенном содержании липидов у *A. dimorphus*, сходстве их жирнокислотного состава и количественных показателей с таковыми других представителей зеленых хлореллоподобных водорослей. Однако нами отмечена родовая/видовая специфика ЖКС для *Acutodesmus* – основу его формирует стеариновая кислота (C18 : 0) в отличие от других родов, для которых свойственно преобладание олеиновой или линоленовой кислоты. Фракционный состав, содержание и лабильность ЖКС, а также высокие ресурсопродукционные показатели (см. рис. 1, 2) позволяют рассматривать этот вид в качестве перспективного объекта для биотехнологических и биоэнергетических исследований (срвн., Gour et al., 2016).

Выводы

В результате скрининга коллекции IBASU-A Института ботаники им. Н.Г. Холодного НАН Украины и ее составляющей – коллекции высокопродуктивных штаммов-продуцентов биомассы (33 штамма 18 видов) как сырьевой базы для дальнейшего производства биодизеля отобрано 5 наиболее перспективных штаммов микроводорослей-продуцентов биомассы. К ним относятся *Chlorella vulgaris* шт. 189, 190, *Parachlorella kessleri* шт. 444 и *Acutodesmus dimorphus* шт. 251, 254. Исследованные штаммы можно оценить как высокопродуктивные.

В жирнокислотном составе исследованных штаммов преобладают комплекс линолевой, линоленовой и пальмитиновой кислот, что зависит от условий культивирования, включая состав и тип питательной среды. Стрессовый фактор (дефицит азота) способствует 1,5-кратному увеличению количества жирных кислот, но мало влияет на их соотношение. Показательным для ЖКС является наличие полиненас-

сыщенных жирных кислот Omega-3, Omega-6 и Omega-7. Однако высокие количественные показатели характерны только для Omega-6 у *Chlorella vulgaris* шт. 190, при этом содержание ПНЖК Omega-3 и Omega-7 было невысоким.

Перечисленные виды водорослей и их штаммы нашли применение в фундаментальных исследованиях и разных областях хозяйственной деятельности. В частности, *Acutodesmus dimorphus* IBASU-A шт. 254, *Chlorella vulgaris* IBASU-A шт. 189 и *Parachlorella kessleri* шт. 197 хорошо известны как продуценты белков, витаминов и других биологически активных соединений. Не менее важна роль *A. dimorphus* шт. 251 и *Ch. vulgaris* в очистке сточных вод разных промышленных производств и создании замкнутых циклов водоиспользования. Наличие разных полезных свойств подтверждает целесообразность комплексного разнонаправленного применения биомассы штаммов указанных видов водорослей в области медицины, фармакологии, энергетики, а также сельского и коммунального хозяйств. Исследованные виды-продуценты биомассы и их штаммы, содержащие повышенное количество липидов, а также обнаруженный фракционный состав их жирных кислот могут стать потенциальными объектами биоэнергоконверсионных исследований и биотехнологического использования.

Выражаем искреннюю благодарность д.б.н. О.О. Молодченковой и Ф.П. Ткаченко за помощь в проведении исследований жирнокислотного состава общих липидов коккоидных зеленых водорослей, а также О.Н. Кривошее – в оформлении графического материала.

Работа выполнена в рамках проектов целевых комплексных программ научных исследований НАН Украины «Биомасса как сырье для биотоплива» («Биотопливо») и «Биоэнергоконверсия».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Верещагин А.Г., Клячко-Гурвич Г.Л. Строение и количественный состав жирных кислот липидов водоросли *Chlorella*. *Биохимия*. 1965. 30(3): 543–550.
- Владимирова М.Г., Семенов В.Е. *Интенсивная культура одноклеточных водорослей (инструкция по первичным испытаниям, выделяемых из природы и селекционируемых форм фотоавтотрофных одноклеточных водорослей)*. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 58 с.
- Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Темнов М.С., Пешкова Е.В., Акулинич Е.И. *Технология получения липидов из микроводорослей*. Тамбов, 2015. 103 с.
- Кирпенко Н.И., Усенко О.М., Мусий Т.О. Биохимический состав зеленых водорослей на разных стадиях роста. *Гидробиол. журн.* 2015а. 51(2): 44–50.
- Кирпенко Н.И., Усенко О.М., Мусий Т.О. Содержание белков, углеводов и липидов в биомассе зеленых водорослей при разной температуре выращивания. *Гидробиол. журн.* 2015б. 51(5): 105–111.

- Кирпенко Н.И., Усенко О.М., Мусий Т.О. Содержание белков, углеводов и липидов при кратковременных колебаниях температуры. *Гидробиол. журн.* 2016а. 52(5): 54–64.
- Кирпенко Н.И., Усенко О.М., Мусий Т.О. Влияние аллелопатического фактора на формирование соотношения белков, углеводов и липидов в клетках зеленых микроводорослей. *Гидробиол. журн.* 2016б. 52(6): 74–87.
- Киселева М.А. *Метаболизм мембранных липидов у свободноживущих и симбиотических зеленых водорослей рода Pseudocostoxuha в условиях дефицита фосфора*: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. СПб, 2008. 23 с.
- Клячко-Гурвич Г.Л., Семененко В.Е. Физиолого-биохимические аспекты направленного получения ценных метаболитов в условиях интенсивной культуры водорослей. *Тр. МОИП.* 1966. 24: 154–159.
- Клячко-Гурвич Г.Л., Семенова А.Н., Семененко В.Е. Липидный обмен хлоропластов при адаптации клеток хлореллы к снижению освещенности. *Физиол. раст.* 1980. 27(2): 370–379.
- Клячко-Гурвич Г.Л., Цоглин Л.Н., Семененко В.Е. Динамика жирнокислотного состава липидов в связи с изменением активности хлоропластов в ходе жизненного цикла хлореллы. В кн.: *Роль низших организмов в круговороте веществ в замкнутых экологических системах: Мат. X Всесоюз. совещ.* (Канев, 1979 г.). Киев: Наук. думка, 1979. С. 188–192.
- Корховой В.И., Блюм Я.Б. Биодизель из микроводорослей: пути повышения эффективности накопления липидов методами генетической инженерии. *Цитол. и генет.* 2015. 47(6): 30–42.
- Ленова Л.И., Ступина В.В. *Водоросли в доочистке сточных вод*. Киев: Наук. думка, 1990. 180 с.
- Методы физиолого-биохимического исследования водорослей в гидробиологической практике*. Отв. ред. А.В. Топачевский. Киев: Наук. думка, 1975. 247 с.
- Музафаров А.М., Таубаев Т.Т. *Культивирование и применение микроводорослей*. Ташкент: ФАН, 1984. 136 с.
- Новицкая Г.В., Сальникова Е.Б., Суворова Т.А. Изменение ненасыщенности жирных кислот липидов растений озимой и яровой пшеницы в процессе закаливания. *Физиол. и биохим. культ. раст.* 1990. 22(3): 257–263.
- Перспективи використання мікрроводорослей у біотехнології*. За ред. О.К. Золотарьової. Київ: Альтерпрес, 2008. 234 с.
- Тренкеншу Р.П. Простейшие модели роста микроводорослей. 1. Периодическая культура. *Экол. моря.* 2005. 67: 89–97.
- Урмыч Е.М., Бердыкулов Х.А., Эшпулатов М.Б. Продуктивность микроводорослей в интенсивных условиях культивирования. *Альгология.* 2008. 18(3): 347–352.
- Царенко П., Борисова О., Блюм Я. Микроводорослі колекції IBASU-A – ресурс біомаси для отримання біодизеля. *Доп. НАН України.* 2012. (11): 172–178.
- Царенко П., Борисова О., Блюм Я. Микроводорослі як об'єкт біоенергетики. Види колекції IBASU-A – перспективні продуценти біомаси як джерела сировини для біопалива. *Вісн. НАН України.* 2011. (5): 49–54.
- Царенко П.М., Борисова Е.В. Коллекция культур микроводорослей IBASU-A – потенциальный ресурс биосырья для производства биодизеля. *Альгология.* 2014. 24(3): 409–412.

- Царенко П.М., Борисова Е.В., Конищук М.А. *Сценедесмусовые водоросли – перспективный сырьевой ресурс для биодизеля*: Тез. докл. (Киев, 22–25 мая 2012 г.). Киев, 2012. С. 321–322.
- Цоглин Л.Н., Пронина Н.А. *Биотехнология микроводорослей*. М.: Науч. мир, 2012. 184 с.
- Цоглин Л.Н., Пульц О., Шторандт Р., Акыев А.Я. Выбор продуктивных форм микроводорослей для массового культивирования. *Альгология*. 1999. 9(3): 73–81.
- Цоглин Л.Н., Семенов В.Е. Повышение продуктивности и КПД фотосинтеза микроводорослей посредством управления возрастным составом популяции. В кн.: *Роль низших организмов в круговороте веществ в замкнутых экологических системах*: Мат. X Всесоюз. совещ. (Канев, 1979 г.). Киев: Наук. думка, 1979. С. 294–303.
- Чернова Н.И., Киселева С.В. Биотопливо из водорослей: технологии, продуктивность, перспективы. *Энергия: экономика, техника, экология*. 2014. (8): 24–32.
- Чернова Н.И., Киселева С.В., Коробкова Т.П., Зайцев С.И. Микроводоросли в качестве сырья для получения биотоплива. *Альтерн. энергет. и экол.* 2008. 65(9): 68–74.
- Чернова Н.И., Киселева С.В., Попель О.С. Эффективность производства биодизеля из микроводорослей. *Теплоэнергетика*. 2014. (6): 14–21.
- Abomohra A., Wagner M., El-Sheekh M.M., Hanelt D. Lipid and total fatty acid productivity in photoautotrophic fresh water microalgae, screening studies towards biodiesel production. *J. Appl. Phycol.* 2013. 25: 931–936.
- Algal culturing techniques*. Ed. R.A. Andersen. Amsterdam: Elsevier Acad. Press, 2005. 578 p.
- Amin S. Review on biofuel oil and gas production processes from microalgae. *Energy Convers. Manag.* 2009. 50: 1834–1840.
- Barbosa M.J., Wiffels R.H. Biofuels from microalgae. In: *Handbook of microalgae culture*. 2nd ed. West Sussex: Wiley-Blackwell, 2013. P. 578–586.
- Baros A.I., Goncalves A.L., Simoes M., Pires J.C.M. Harvesting techniques applied to microalgae: A review. *Renew. Sustain Energy Rev.* 2015. 41: 1489–1500.
- Biodiesel – Feedstocks and Processing Technologies*. Eds M. Stoytcheva, G. Montero. Rijeka: InTech., 2011. 740 p.
- Borisova E.V., Tsarenko P.M. Microalgae Culture Collection of Ukraine (IBASU-A): traditions and modern directions. *Nova Hedw.* 2004. 79(1–2): 127–134.
- Borowitzka M.A. Techno-economic modeling biofuels from microalgae. In: *Algae for biofuel and energy*. Dordrecht; London: Springer, 2013. P. 255–264.
- Brennan L., Owende P. Biofuels from microalgae. – A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renew. Sustain Energy Rev.* 2010. 14(2): 557–577.
- Chantsungnoen T., Chisti Y. Oil production by six microalgae: impact of flocculants and drying on oil recovery from the biomass. *J. Appl. Phycol.* 2016. 28: 2697–2705.
- Chaudhary R., Khattar J.I.S., Singh D.P. Microalgae as feedstock for biodiesel: biomass yield, lipid content and fatty acid composition as selection criteria. *Int. J. Power Renew. Energy Syst.* 2014. 1: 62–71.
- Chen Ch.-L., Huang Ch.-Ch., Ho K.-Ch., Hsiao P.-X., Wu M.-Sh., Chang J.-Sh. Biodiesel production from wet microalgae feedstock using sequential wet extraction/transesterification and direct transesterification processes. *Biores. Technol.* 2015. 194: 179–186.

- Cheng D., He Q. Assessment of environmental stresses for enhanced microalgal biofuel production – an overview. *Front. Energy Res.* 2014. 2: 1–26.
- Chisti Y. Biodiesel from microalgae. *Biotech. Adv.* 2007. 25: 294–306.
- Daliry S., Hallajisani A., Roshandeh J.M., Nouri H., Golzary A. Investigation of optimal condition for *Chlorella vulgaris* microalgae growth. *Global J. Environ. Sci. Manag.* 2017. 3(2): 217–230.
- El-Sheekh M.M., El-Gamal A., Bastawess A.E., El-Bokhomy A. Production and characterization of biodiesel from the unicellular green alga *Scenedesmus obliquus*. In: *Energy sources. Pt A: Recovery, utilization and environmental effects*. Tanta: Taylor and Franc. Group, 2017. P. 1–11.
- Gour R.S., Chawla A., Singh H., Chauhan R.S., Kant A. Characterization and screening of native *Scenedesmus* sp. Isolates suitable for biofuel feedstock. *PLoSone*. 2016. 11(5): 1–16.
- Gouveia L. *Microalgae as a feedstock for biofuels*. Heidelberg, etc.: Springer, 2011. 69 p.
- Hamedy Sh., Mahdavi M.A., Gheshlaghi R. Improved lipid and biomass productivities in *Chlorella vulgaris* by differing the inoculation medium from the production medium. *Biofuel Res. J.* 2016. 10: 410–416.
- Harris P., James A.T. The effect of low temperature on fatty acid biosynthesis in plants. *Biochem. J.* 1969. 112(3): 325–330.
- Havrysh V. *Prospect of renewable energy resource supply of agriculture*. MOTROL, 2011. 13A: 107–116.
- Ho S.H., Chen W.M., Chang J.S. *Scenedesmus obliquus* CNW-N as a potencial candidate for CO₂ mitigation and biodiesel production. *Biores. Technol.* 2010. 101: 8725–8730.
- Korkhovoy V., Tsarenko P., Blume Ya. Genetically engineered microalgae for enhanced biofuel production. *Curr. Biotechnol.* 2016. 5(4): 256–265.
- Krienitz L., Huss V.A.R., Bock Ch. *Chlorella*: 125 years of the green survivalist. *Trends Plant Sci.* 2015. 20(2): 67–69.
- Liang Y., Sarkany N., Cui Y. Biomass and lipid productivities of *Chlorella vulgaris* under autotrophic, heterotrophic and mixotrophic growth conditions. *Biotechnol. Lett.* 2009. 31(7): 1043–1049.
- Liu J. Perspectives of green microalgal research for biofuels. *Algal. Stud.* 2014. 145–146: 15–25.
- Liu J., Li Q., Liu Q., He M., Zhang L., Liu Y.D., Ding Y., Zhang Zh., Lin W., Song P., Li L., Huang Y., Han Ch. Screening of unicellular microalgae for biofuels and bioactive products and development of a pilot platform. *Algal. Stud.* 2014. 145–146: 99–117.
- Livansky K., Doucha J. Productivity of the microalga *Chlorella kessleri* in outdoor open thin-layer batch cultures. *Algal. Stud.* 2000. 97: 103–122.
- Michalak I., Chojnacka K. Algae as production systems of bioactive compounds. *Eng. Life Sci.* 2015. 15(2): 160–176.
- Milano J., Ong H.Ch., Masjuki H.H., Chong W.T., Lam M.K., Loh P.K., Vellayan V. Microalgae biofuels as an alternative to fossil fuel for power generation. *Renew. Sust. Energy Rev.* 2016. 58: 180–197.
- Mitra D., van Leeuwen J., Lamsal B. Heterotrophic/mixotrophic cultivation of oleaginous *Chlorella vulgaris* on industrial co-products. *Algal Res.* 2012. 1(1): 40–48.
- Ramachandra T.V., Sajina K., Supriya G. Lipid composition in microalgal community under laboratory and outdoor conditions. *Ind. J. Sci. Technol.* 2011. 4(11): 1488–1494.

- Richardson J.W., Johnson M.D., Outlaw J.L. Economic comparison of open pond raceways to photo bio-reactors for profitable production of algae for transportation fuels in the Southwest. *Algal Res.* 2012. 1: 93–100.
- Safi C., Zebib B., Merah O., Pontalier P.Y., Vaca-Garcia C. Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. *Renew. Sust. Energy Rev.* 2014. 35: 265–278.
- Saifullah A.Z.A., Karim A.Md., Ahmad-Yazid A. Microalgae: an alternative source of renewable energy. *Amer. J. Eng. Res.* 2014. 3(3): 330–338.
- Škaloud P., Němcová Y., Pytela J., Bogdanov N.I., Bock Ch., Pickinpaugh S.H. *Planktochlorella nurekis* gen. et sp. nov. (*Trebouxiophyceae*, *Chlorophyta*) a novel coccoid green alga carrying significant biotechnological potencial. *Fottea.* 2014. 14: 53–62.
- Soeder C.J., Hegewald E. *Scenedesmus / Microalgal biotechnology*. New York: Cambridge Univ. Press, 1988. P. 59–84.
- Spolaore P., Joannis-Cassan C., Duran E., Isambert A. Commercial applications of microalgae. *J. Biosci. Bioeng.* 2006. 101(2): 87–96.
- Sri-uam P., Linthong Zh., Powtongsook S., Kungvansaichol K., Pavasant P. Manipulation of biochemical compositions of *Chlorella* sp. *Eng. J.* 2014. 19(4): 14–24.
- Tamiya H. Role of algae as food. *Rep. Jap. Microalg. Res. Inst.* 1959. 1(2): 9–23.
- Tsarenko P., Borisova O., Blume Ya. High biomass producers and promising candidates for biodiesel production from microalgae collection IBASU-A (Ukraine). *Oceanol. Hydrobiol. Stud.* 2016. 73(1): 79–85.
- Tsarenko P., Borysova O. The IBASU-A collection of algal strains as bioresources for biodiesel production. In: *Actual Problems in Modern Phycology*: Mat. V Int. Conf. Chisinau, 2014. P. 114–117.
- Yang J., Xu M., Zhang X., Hu Q., Sommerfeld M., Chen Y. Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: water footprint and nutrients balance. *Biores. Technol.* 2011. 102(1): 159–165.
- Zhang Q., Hong Yu. Comparison of growth and lipid accumulation properties of two oleaginous microalgae under different nutrient conditions. *Front. Environ. Sci. Eng.* 2014. 8(5): 703–709.
- Zhu L. Microalgal culture strategies for biofuels production: A review. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 2015. 9: 801–814.

Поступила 12 июня 2017 г.

Подписала в печать А.В. Лищук-Курейшевич

REFERENCES

- Abomohra A., Wagner M., El-Sheekh M.M., Hanelt D.J. *Appl. Phycol.* 2013. 25: 931–936.
- Algal culturing techniques*. Ed. R.A. Andersen. Amsterdam: Elsevier Acad. Press, 2005. 578 p.
- Amin S. *Energy Convers. Manag.* 2009. 50: 1834–1840.
- Barbosa M.J., Wiffels R.H. *Handbook of microalgae culture*. 2nd ed. West Sussex: Wiley-Blackwell, 2013. P. 578–586.
- Baros A.I., Goncalves A.L., Simoes M., Pires J.C.M. *Renew. Sust. Energy Rev.* 2015. 41: 1489–1500.
- Biodiesel – Feedstocks and Processing Technologies*. Eds M. Stoytcheva, G. Montero. Rijeka: InTech., 2011. 740 p.

- Borisova E.V., Tsarenko P.M. *Nova Hedw.* 2004. 79(1–2): 127–134.
- Borowitzka M.A. *Algae for biofuel and energy.* Dordrecht; London: Springer, 2013. P. 255–264.
- Brennan L., Owende P. *Renew. Sust. Energy Rev.* 2010. 14(2): 557–577.
- Chantsungnoen T., Chisti Y. *J. Appl. Phycol.* 2016. 28: 2697–2705.
- Chaudhary R., Khattar J.I.S., Singh D.P. *Int. J. Power Renew. Energy Syst.* 2014. 1: 62–71.
- Chen Ch.-L., Huang Ch.-Ch., Ho K.-Ch., Hsiao P.-X., Wu M.-Sh., Chang J.-Sh. *Biores. Technol.* 2015. 194: 179–186.
- Cheng D., He Q. *Front. Energy Res.* 2014. 2: 1–26.
- Chernova N.I., Kiseleva S.V. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya.* 2014. (8): 24–32.
- Chernova N.I., Kiseleva S.V., Korobkova T.P., Zaytsev S.I. *Altern. Energet. and Ekol.* 2008. 65(9): 68–74.
- Chernova N.I., Kiseleva S.V., Popel O.S. *Teploenergetika.* 2014. (6): 14–21.
- Chisti Y. *Biotechnol Adv.* 2007. 25: 94–306.
- Daliry S., Hallajisani A., Roshandeh J.M., Nouri H., Golzary A. *Global J. Environ. Sci. Manag.* 2017. 3(2): 217–230.
- Dvoretzky D.S., Dvoretzky S.I., Temnov M.S., Peshkov E.V., Akulinich E.I. *Technologia poluchenia lipidov iz mikrovodorosley [Technology of receiving lipids from microalgae].* Tambov, 2015. 103 p.
- El-Sheekh M.M., El-Gamal A., Bastawess A.E., El-Bokhomy A. Production and characterization of biodiesel from the unicellular green alga *Scenedesmus obliquus*. In: *Energy sources. Pt A: Recovery, utilization and environmental effects.* Tanta: Taylor Francis Group, 2017. P. 1–11.
- Gour R.S., Chawla A., Singh H., Chauhan R.S., Kant A. *PLoSone.* 2016. 11(5): 1–16.
- Gouveia L. *Microalgae as a feedstock for biofuels.* Heidelberg, etc.: Springer, 2011. 69 p.
- Hamedy Sh., Mahdavi M.A., Gheshlaghi R. *Biofuel Res. J.* 2016. 10: 410–416.
- Harris P., James A.T. *Biochem. J.* 1969. 112(3): 325–330.
- Havrysh V. *Prospect of renewable energy resource supply of agriculture.* MOTROL. 2011.13A: 107–116.
- Ho S.H., Chen W.M., Chang J.S. *Biores. Technol.* 2010. 101: 8725–8730.
- Kirpenko N.I., Usenko O.M., Musiy T.O. *Hydrobiol. J.* 2015a. 51(2): 44–50.
- Kirpenko N.I., Usenko O.M., Musiy T.O. *Hydrobiol. J.* 2015b. 51(5): 105–111.
- Kirpenko N.I., Usenko O.M., Musiy T.O. *Hydrobiol. J.* 2016a. 52(5): 54–64.
- Kirpenko N.I., Usenko O.M., Musiy T.O. *Hydrobiol. J.* 2016b. 51(2): 74–87.
- Kiseleva M.A. *Metabolizm membrannykh lipidov u svobodnozhivushchikh i simbioticheskikh zelenikh vodorosley roda Pseudococcomyxa v usloviyakh defitsita fosfora [Metabolism of membrane lipids in free-living and symbiotic green algae of the genus Pseudococcomix in conditions of phosphorus deficiency].* Abstr. Ph.D. (Biol.). SPb, 2008. 23 p.
- Klyachko-Gurvich G.L., Semenenko V.E. *Trudy MOIP.* 1966. 24: 154–159.
- Klyachko-Gurvich G.L., Semenova A.N., Semenenko V.E. *Fiziol. Rast.* 1980. 27(2): 370–379.
- Klyachko-Gurvich G.L., Tsoglin L.N., Semenenko V.E. *Rol nizshikh organizmov v krugovorote veshchestv v zamknutykh ekologicheskikh sistemakh: Mat. X Vsesoyuz. soveshch. [The role of lower organisms in the circulation of substances in closed ecological systems: Mat. X All-Union. Meet.]* (Kanev, 1979). Kiev: Nauk. Dumka Press, 1979. P. 188–192.
- Korkhovoy V., Tsarenko P., Blume Ya. *Curr.Biotechnol.* 2016. 5(4): 256–265.
- Korkhovoy V.I., Blume Ya.B. *Tsitol. i Genet.* 2015. 47(6): 30–42.

- Krienitz L., Huss V.A.R., Bock Ch. *Trends Plant Sci.* 2015. 20(2): 67–69.
- Lenova L.I., Stupina V.V. *Vodorosli v doochistke stochnykh vod [Algae in the post-treatment of wastewater]*. Kiev: Nauk. Dumka Press, 1990. 180 p.
- Liang Y., Sarkany N., Cui Y. *Biotechnol. Lett.* 2009. 31(7): 1043–1049.
- Liu J. *Algol. Stud.* 2014. 145–146: 15–25.
- Liu J., Li Q., Liu Q., He M., Zhang L., Liu Y.D., Ding Y., Zhang Zh., Lin W., Song P., Li L., Huang Y., Han Ch. *Algol. Stud.* 2014. 145/146: 99–117.
- Livansky K., Doucha J. *Algol. Stud.* 2000. 97: 103–122.
- Metody fiziologo-biokhimicheskogo issledovaniya vodorosley v gidrobiologicheskoy praktike*. Ed. A.V. Topachevskiy [*Methods of physiological and biochemical study of algae in hydrobiological practice*]. Kiev: Nauk. Dumka Press, 1975. 247 p.
- Michalak I., Chojnacka K. *Eng. Life Sci.* 2015. 15(2): 160–176.
- Milano J., Ong H.Ch., Masjuki H.H., Chong W.T., Lam M.K., Loh P.K., Vellayan V. Microalgae biofuels as an alternative to fossil fuel for power generation. *Renew. Sust. Energy Rev.* 2016. 58: 180–197.
- Mitra D., van Leeuwen J., Lamsal B. *Algal Res.* 2012. 1(1): 40–48.
- Muzafarov A.M., Taubaev T.T. *Kultivirovanie i primeneniye mikrovodorosley [Cultivation and application of microalgae]*. Tashkent: FAN, 1984. 136 p.
- Novitskaya G.V., Salnikova E.B., Suvorova T.A. *Fiziol. Biokhim. Kult. Rast.* 1990. 22(3): 257–263.
- Perspektivy vykorystannia mikrovodorostey u biotekhnologii [Prospects for the use of algae in biotechnology]*. Ed. O.K. Zolotareva. Kyiv: Alterpress, 2008. 234 p.
- Ramachandra T.V., Sajina K., Supriya G. *Ind. J. Sci. Technol.* 2011. 4(11): 1488–1494.
- Richardson J.W., Johnson M.D., Outlaw J.L. *Algal Res.* 2012. 1: 93–100.
- Safi C., Zebib B., Merah O., Pontalier P.Y., Vaca-Garcia C. *Renew. Sust. Energy Rev.* 2014. 35: 265–278.
- Saifullah A.Z.A., Karim A.Md., Ahmad-Yazid A. *Amer. J. Eng. Res.* 2014. 3(3): 330–338.
- Škaloud P., Němcová Y., Pytela J., Bogdanov N.I., Bock Ch., Pickinpaugh S.H. *Fottea*. 2014. 14: 53–62.
- Soeder C.J., Hegewald E. *Scenedesmus*. In: *Microalgal biotechnology*. New York: Cambridge Univ. Press, 1988. P. 59–84.
- Spolaore P., Joannis-Cassan C., Duran E., Isambert A. *J. Biosci. Bioeng.* 2006. 101(2): 87–96.
- Sri-uam P., Linthong Zh., Powtongsook S., Kungvansaichol K., Pavasant P. *Eng. J.* 2014. 19(4): 14–24.
- Tamiya H. *Rep. Jap. Microalg. Res. Inst.* 1959. 1(2): 9–23.
- Trenkenshu R.P. *Ekol. Mor.* 2005. 67: 89–97.
- Tsarenko P., Borisova O., Blume Ya. *Oceanol. and Hydrobiol. Stud.* 2016. 73(1): 79–85.
- Tsarenko P., Borisova O., Blyum Ya. *Dop. NAN Ukr.* 2012. (1): 172–178.
- Tsarenko P., Borisova O., Blyum Ya. *Visn. NAN Ukr.* 2011. (5): 49–54.
- Tsarenko P., Borysova O. *Actual Problems in Modern Phycology: Abstr. V Int. Conf. Chisinau (Moldova)*, 2014. P. 114–117.
- Tsarenko P.M., Borisova E.V. *Algologia*. 2014. 24(3): 409–412.
- Tsarenko P.M., Borisova E.V., Konishchuk M.A. *Scenedesmusove vodorosli – perspektivnyi syrevoy resurs dlia biodizelia: Tez. dokl. [Scenedesmus as a perspective resource for biodiesel]*. Abstracts. Kiev, 2012. P. 321–322.
- Tsoglin L.N., Pronina N.A. *Biotekhnologiya mikrovodorosley [Biotechnology of microalgae]*. Moscow: Nauch. Mir Press, 2012. 184 p.

- Tsoglin L.N., Pults O., Shtorandt R., Akyev A.Ya. *Algologia*. 1999. 9(3): 73–81.
- Tsoglin L.N., Semenenko V.E. *Rol nizshikh organizmov v krugovorote veshchestv v zamknutykh ekologicheskikh sistemakh*: Mat. Vsesoyuz. Soveshch. [The role of lower organisms in the circulation of substances in a closed ecological systems: Abstracts]. Kiev: Nauk. Dumka Press, 1979. P. 294–303.
- Urmych E.M., Berdykulov Kh.A., Eshpulatov M.B. *Algologia*. 2008. 18(3): 347–352.
- Vereshchagin A.G., Klyachko-Gurvich G.L. *Biochimia*. 1965. 30(3): 543–550.
- Vladimirova M.G., Semenenko V.E. *Intensivnaia kultura odnokletochnykh vodorosley (instructia po pervichnym ispytaniyam, vydelaemykh iz prirody i selekzioniruemym form fotoavtotrofnym odnokletochnykh vodoroslei)* [The intensive culture of monocelled seaweed (the instruction for primary tests, the forms of photoautotrophic monocelled seaweed allocated from the nature and selected)]. M.: Acad. Sci. USSR Press, 1962. 58 p.
- Yang J., Xu M., Zhang X., Hu Q., Sommerfeld M., Chen Y. *Biores. Technol.* 2011. 102(1): 159–165.
- Zhang Q., Hong Yu. *Front. Environ. Sci. Eng.* 2014. 8(5): 703–709.
- Zhu L. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 2015. 9: 801–814.

ISSN 0868-854 (Print)

ISSN 2413-5984 (Online). *Algologia*. 2017, 27(4): 382–402

doi: 10.15407/alg27.04.382

Tsarenko P.M.¹, Konischuk M.A.¹, Korkhovoy V.I.²,
Kostikov I.Yu.³, Blume Ya.B.²

¹N.G. Kholodny Institute of Botany of the NAS of Ukraine,
2, Tereshchenkivska Str., Kiev 01004, Ukraine

²Institute of Food Biotechnology and Genomics of the NAS of Ukraine,
2a Oshpovskiy Str., Kiev 04123, Ukraine

³Department of Plant Biology, Institute of Biology and Medicine,
Taras Shevchenko National University of Kiev,
2 Acad. Glushkov Ave., Kiev 03022, Ukraine

FATTY ACID COMPOSITION OF COCOID GREEN ALGAE AS A BASIS FOR ENERGY AND PRIMARY PRODUCTS POTENTIAL. 1. *CHLORELLA*- AND *ACUTODESMUS*-LIKE MICROALGAE (*CHLOROPHYTA*)

Bioproduction parameters of the strains of *Chlorella*- and *Acutodesmus*-like algae of the IBASU-A collection of the N.G. Kholodny Institute of Botany of the NAS of Ukraine were studied. The characteristic features of their growth and productivity, and the capacities of the *Chlorella vulgaris* Beij. and *Acutodesmus dimorphus* (Turpin) P. Tsarenko strains as objects of industrial cultivation were analyzed. The features of fatty acid (FA) composition of strains under standard conditions of laboratory cultivation are studied. The taxonomic (generic) specificity of the leading complex of FA has been revealed. The variability of the total lipid content in the representatives of the examined genera was found. The potential 1.5-fold increase in the amount of lipids or fractional amounts of certain fatty acids during the stationary growth phase of the culture under the influence of stress factors (nitrogen deficiency) is revealed.

Key words: *Chlorella*, *Acutodesmus*, lipids, fatty acid composition, bioenergetics