

УДК 556:574.5

## ГАЛОФИТ АСТРА СОЛОНЧАКОВАЯ (*ASTER TRIPOLIUM* L.) – ГИПЕРАККУМУЛЯТОР FE, NI, PB НА ЛИТОРАЛИ БЕЛОГО МОРЯ (П. РАБОЧЕОСТРОВСК)

Теребова Е.Н., Павлова М.А.

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», Петрозаводск,  
e-mail: eterebova@gmail.com

В работе исследованы условия произрастания и накопления тяжелых металлов доминантным галофитным видом астра солончаковая (*Aster tripolium* L.) приливно-отливной зоны Белого моря в районе п. Рабоче-островск. Три пробные площади были заложены на берегах острова Октябрьской революции в июле 2019 г. Грунты приморских территорий – примитивные маршевые песчаные и супесчаные литоральные – не загрязнены тяжелыми металлами (содержание металлов превышает фоновые значения). Среднее содержание железа в морском грунте литорали установлено в количестве  $13179,39 \pm 6968$  мг/кг, марганца –  $122,29 \pm 47$  мг/кг, цинка –  $31,21 \pm 19$  мг/кг, меди –  $14,36 \pm 9$  мг/кг, никеля –  $12,39 \pm 7$  и свинца – на уровне  $7,59 \pm 5$  мг/кг. Морская вода соленостью 23–26‰ была сильно загрязнена нитратами до значений 83,72 мг/л (2,1 ПДК), никелем до значений 0,18 мг/л (17,7 ПДК), железом – 0,32 мг/л (6,4 ПДК) и свинцом – 0,098 мг/л (9,8 ПДК). Поступление тяжелых металлов в воды Белого моря, возможно, происходит со стоковыми течениями рек от металлургических предприятий Северо-Запада России. Растения астры солончаковой депонировали до 32 г/кг железа, 560 мг/кг никеля и 478 мг/кг свинца, 70–90% всех металлов накапливалось корнями растений астры. Исследованы коэффициенты биологического поглощения (КБП) металлов всем растением, корнями и надземными органами. Ряд накопления металлов всем растением астры солончаковой: Ni (15,84) > Pb (8,21) > Zn (2,93) > Cu (2,82) > Mn (2,08) > Fe (1,71). Предложено считать астру солончаковую гипераккумулятором Fe, Ni, Pb на литорали Белого моря.

**Ключевые слова:** *Aster tripolium*, галофит, гипераккумулятор металлов, литоральные грунты, Белое море

## THE HALOPHYTE *ASTER TRIPOLIUM* L. IS A HYPERACCUMULATOR OF FE, NI, PB ON THE LITTORAL OF THE WHITE SEA

Terebova E.N., Pavlova M.A.

Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, e-mail: eterebova@gmail.com

The conditions of growth and accumulation of heavy metals by the halophytic species *Aster tripolium* L. on the tidal zone of the White Sea (Rabochestrovsk) were studied. Three sample plots were established on shores of the island of the October Revolution in July 2019. Primitive marsh sandy soils of coastal territories are not contaminated with heavy metals (the metal content exceeds background values). The average iron content in the littoral soil was  $13179,39 \pm 6968$  mg / kg, manganese  $122,29 \pm 47$  mg / kg, zinc  $31,21 \pm 19$  mg / kg, copper  $14,36 \pm 9$  mg / kg, nickel  $12,39 \pm 7$  and lead at the level of  $7,59 \pm 5$  mg / kg. Sea water (salinity 23–26‰) is significantly polluted with nitrates (83,72 mg/l; 2,1 MPC), nickel (0,18 mg/l; 17,7 MPC), iron (0,32 mg/l; 6,4 MPC) and lead (0,098 mg/l; 9,8 MPC). The accumulation of iron, lead and nickel in the sea water is possibly associated with the traffic of these metals with the river flows from metallurgical enterprises of the North–West of Russia. *Aster tripolium* accumulated 32 g / kg of iron, 560 mg / kg of nickel and 478 mg / kg of lead. The roots of asters accumulated 70–90% of the total metal content in plants. We studied the coefficients of biological absorption (CBA) of heavy metals by the whole plants, roots and aboveground organs. The series of metal accumulation by the whole plant of *Aster tripolium*: Ni(15,84) > Pb(8,21) > Zn(2,93) > Cu(2,82) > Mn(2,08) > Fe(1,71). It was proposed to consider *Aster tripolium* as a hyperaccumulator of Fe, Ni, Pb in the littoral zone of the White Sea.

**Keywords:** *Aster tripolium* L., halophyte, metal hyperaccumulator, littoral soils, the White Sea

Усиленное освоение приморских территорий в Арктическом регионе привело к увеличению антропогенной нагрузки на морские экосистемы в виде загрязнения разными видами органических веществ и тяжелых металлов [1]. Разработка систем фиторемедиации соленых морских вод приморских территорий становится одним из основных направлений теоретических и прикладных исследований в экологии и природопользовании. Фиторемедиация определяется как использование растений для очистки окружающей среды от загрязнителей путем их депонирования и перево-

да в нетоксичную форму [2]. В литературе имеются примеры использования различных родов галофитов (*Zostera*, *Atriplex*, *Salicornia*) для фиторемедиации морских территорий [3–5].

На приморских территориях зоной контакта суши и моря является литораль. Для нее характерна приливно-отливная динамика морской воды. Два раза в сутки растения то заливаются водой, то осушаются, при этом полностью меняется среда обитания растений и все климатические условия. На литорали успешно произрастают и проходят все этапы развития уникаль-

ные растения галофиты, имеющие механизмы адаптации к стрессовым условиям существования [6]. Однако вопрос о возможности поглощения и накопления растениями литорали тяжелых металлов остается открытым.

Цель исследования – оценить условия обитания и накопление тяжелых металлов в растениях астры солончаковой (*Aster tripolium* L.) на приливно-отливной зоне Белого моря (п. Рабочеостровск).

### Материалы и методы исследования

#### Район исследования

Работа выполнена на побережье Белого моря в районе г. Кемь, п. Рабочеостровск (Кемский район) (рис. 1), в июле 2019 г. Поселок Рабочеостровск расположен в зоне шхерных берегов побережья Белого моря. На западном и восточном берегах острова Октябрьской революции (соединён насыпью с коренным берегом) были заложены пробные площади. На трех пробных площадях (ПП) от линии уреза воды (во время отлива) до зоны контакта штормовых выбросов у коренного берега были заложены три трансекты. На пробных площадях по трансектам было сделано описание растительности, грунтов литорали, собраны растения астры солончаковой, грунт под растениями и пробы морской воды. Названия маршевых почвогрунтов даны по работе М.А. Цейца (2005) [7].

**ПП1** – западная часть о. Октябрьской революции – 65°00'37.3"N 34°48'10.6"E, расположена на пологом илисто-песчаном берегу с наличием валунно-галечниковых скоплений (размер валунов от 30 до 50 см) в средней части литорали. Соленость морской воды в отлив 24%. От коренного берега до линии уреза воды маршевый примитивный супесчаный оторфованный грунт переходил в маршевый примитивный супесчаный оглеенный грунт и далее – в супесчаный литоральный грунт. Общее видовое богатство изученных сообществ составляет 19 видов [8].

**ПП2** – восточный берег о. Октябрьской революции – 64°59'43.2"N 34°47'35.0"E. Илисто-песчаный берег довольно завалунен, встречаются как крупные (1,5 м), так и более мелкие валуны (около 60 см). Соленость морской воды в отлив 23%. Грунт песчаный оглеенный литоральный. Общее видовое богатство изученных сообществ составляет 13 видов [8].

**ПП3** – район порта – 64°59'29.5"N 34°47'19.4"E, расположена на скалистых

выступах берегов, обнажающихся в отлив (луды). Поверхность осушки нередко покрыта морскими выбросами и нанесенным приливами мусором (древесные остатки с металлическими гвоздями, пластиковые пакеты, битое стекло и др.). Соленость морской воды в отлив 26%.

Грунт слоистый заиленный песчаный литоральный. Общее видовое богатство изученных сообществ составляет 4 вида [8] (рис. 1).

#### Объект исследования

Объект исследования – Астра солончаковая (*Aster tripolium* L.) относится к семейству Астровые (*Asteraceae*), евроазиатский бореальный вид, являющийся доминантом и субдоминантом различных приморских растительных сообществ (рис. 2). Это распространенный вид приморского галофитного комплекса [9].

#### Методы исследования

Определение *солености воды* проводили рефрактометром RHS-10ATC.

*Содержание тяжелых металлов* определяли атомно-абсорбционным методом (атомно-абсорбционный спектрофотометр AA-7000 (Shimadzu, Япония) на оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук». В работе представлены валовые средние арифметические значения содержания тяжелых металлов в грунтах, корнях, надземных органах, целом растении и морской воде.

*Коэффициент биологического поглощения* (КБП) металлов рассчитывали как отношение содержания металла в растении к сумме его содержания в воде и грунте. КБП металлов характеризует способность растений поглощать тяжелые металлы из среды. Считается, что если коэффициент больше единицы, то растение активно накапливает металлы. Литоральный грунт собирали непосредственно в зоне корней растений. Растения астры солончаковой отбирали в средней части литорали на каждой пробной площади (n = 5) и делили на корни и надземную часть.

#### Статистическая обработка данных

Достоверность полученных результатов оценивали с помощью критерия Фишера, регрессионного и корреляционного анализов с учетом объема сравниваемых совокупностей и порога доверительной вероятности 0,95 (программа Statgraphics 2.1 для Windows).



Рис. 1. Пробные площадки (ПП1, ПП2, ПП3)

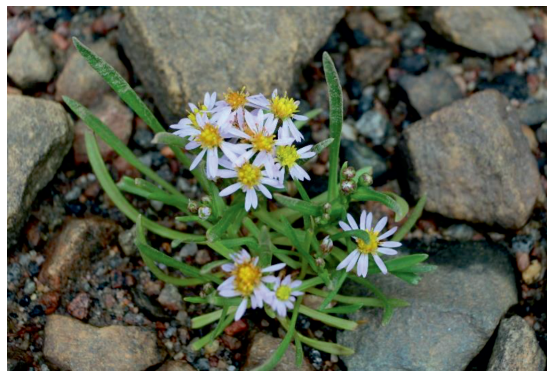


Рис. 2. Астра солончаковая *Aster tripolium L.*

### Результаты исследования и их обсуждение

#### Содержание элементов в грунтах и морской воде

Морская вода в окрестностях п. Рабочеостровск значительно загрязнена нитратами до 2,1–0,9 ПДК, железом – до 6,4–0,8 ПДК, никелем – до 17,7–14,8 ПДК и свинцом – до 9,8–2,4 ПДК. Наибольшее загрязнение морской воды этими элементами на ПП1. Содержание марганца, цинка и меди в морской воде не превышает предельно допустимых значений. Соленость воды 23–26‰.

Литоральные грунты на пробных площадях не загрязнены тяжелыми металлами (табл. 2). Среднее содержание железа в грунте (ПП1–ПП3) было на уровне  $13179,39 \pm 6968$  мг/кг, марганца –  $122,29 \pm 47$  мг/кг, цинка –  $31,21 \pm 19$  мг/кг, меди –  $14,36 \pm 9$  мг/кг, никеля –  $12,39 \pm 7$  и свинца на уровне  $7,59 \pm 5$  мг/кг. Однако можно отметить более высокие уровни металлов в грунтах на ПП3 (район порта), превышающие фоновые значения по меди, свинцу и цинку и равные 0,4 ОДК цинка, 0,9 ОДК меди, 0,8 ОДК никеля и 0,6 ОДК свинца.

#### Накопление элементов растениями *Aster tripolium L.*

Установлена положительная связь между содержанием элементов в среде обитания (грунт + вода) и накоплением металлов

астрой солончаковой. Коэффициенты корреляции (r) между содержанием металлов в среде и в растениях астры равны для железа 0,51; марганца 0,33; для цинка 0,83; меди 0,90; никеля 0,64 и свинца 0,95. Рассмотрим накопление каждого металла подробнее.

**Железо.** Астра солончаковая накапливала железо в количестве 15–32 г. Это очень высокие значения содержания железа у растений (ПДК > 0,5 г). Астра – гипераккумулятор железа на литорали Белого моря. При этом максимальное накопление железа установлено на ПП3 (зона порта) и в целом 90% от общего содержания в растении железа накапливалось в корнях астры. КБП железа больше единицы и равны 1,06–2,50 (табл. 3).

**Марганец.** Марганец накапливался в растениях астры в значениях 137–417 мг/кг, на ПП2 до значений ПДК. КБП 0,91–4,76. Основная часть марганца (70%) также накапливалась в корнях астры (табл. 3).

**Цинк.** Содержание цинка в растениях было на уровне 30–250 мг/кг, максимально на ПП3 (зона порта), где накопление марганца превышало критический уровень для растений. КБП 1,36–3,94 и 90–50% металла накапливалось также в подземных органах астры.

**Медь.** Медь была на уровне 12–70 мг/кг в растениях астры, при этом максимальные значения были установлены также у растений ПП3 (превышение ПДК). КБП 1,78–3,86. Корни астры накапливали 50–80% всей содержащейся в растении меди (табл. 3).

**Таблица 1**

Содержание элементов в морской воде в районе пробных площадей приливно-отливной зоны Белого моря (п. Рабочееостровск)

Пробная площадь	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> мг/л	Cl <sup>-</sup> г/л	Минерализация г/л	Fe мг/л	Mn мг/л	Zn мг/л	Ni мг/л	Cu мг/л	Pb мг/л
ПП1	83,72	2,41	12,4	0,32	0,014	0,008	0,165	0,00068	0,098
ПП2	43,68	1,76	7,8	0,04	0,011	0,028	0,148	0,00001	0,024
ПП3	50,25	2,24	11,8	0,05	0,004	0,003	0,177	0,00027	0,064
М	59,21	2,13	10,67	0,14	0,01	0,01	0,16	0	0,06
σ	21,47	0,34	2,51	0,16	0,01	0,01	0	0	0,04
Фон*	–	> 2,5	–	0,01	0,002	0,010	0,002	0,003	0,00003
ПДК**	39,00	–	–	0,05	0,050	0,050	0,01	0,01	0,01

М – среднее арифметическое, σ – стандартное отклонение, \*Фон – естественный уровень исследуемых показателей морской воды, \*\* ПДК в морской воде водных объектов рыбохозяйственного значения [10].

**Таблица 2**

Содержание элементов в грунтах пробных площадей приливно-отливной зоны Белого моря (п. Рабочееостровск)

Пробная площадь	Металл	Fe	Mn	Zn	Cu	Ni	Pb
	мг/кг						
ПП1	М	19119,39	150,90	21,39	6,94	10,41*	3,93
	σ	4532,39	40,84	4,77	2,60	2,49	0,95
ПП2	М	7263,17*	87,63*	8,91	4,91	3,85*	1,67
	σ	2372,81	25,28	0,54	1,52	0,06	0,57
ПП3	М	13155,60	128,35	63,33*	31,23*	22,90*	17,18*
	σ	5124,40	23,44	10,15	7,81	5,80	3,50
Фон ДО <sup>1</sup>		–	–	62	18	30	15
ОДК <sup>2</sup>		46500	1500	150	35	30	30

<sup>1</sup>Фоновые значения содержания тяжелых металлов в донных отложениях (ДО) морей.

<sup>2</sup>ОДК – ориентировочно допустимые концентрации для незагрязненных донных осадков по SFT [11].

\*данные, представленные со звездочкой, достоверно различаются по ПП согласно Fisher's LSD test. (p ≤ 0,05).

**Таблица 3**

Содержание тяжелых металлов (М – среднее арифметическое значение), мг/кг, и коэффициент биологического поглощения металлов (КБП) в целом растении, надземных органах и корнях *Aster tripolium* L. приливно-отливной зоны Белого моря (п. Рабочееостровск)

Элемент	Fe	Mn	Zn	Cu	Ni	Pb
мг/кг						
ПП1						
М <sub>все раст</sub>	20284 ± 700	137,17 ± 50,11	29,17 ± 7,23	12,38 ± 3,00	66,30 ± 15,14	10,25 ± 3,12
М <sub>надз</sub>	2556 ± 300	49,23 ± 33	13,98 ± 9,00	5,40 ± 2,21	12,53 ± 4,65	1,28 ± 0,50
М <sub>корень</sub>	17728 ± 1500	87,94 ± 21	15,19 ± 5,10	6,97 ± 1,58	53,77 ± 7,02	8,98 ± 1,22
КБП <sub>раст</sub>	1,06	0,91	1,36	1,78	6,27	2,55
КБП <sub>надз</sub>	0,13	0,33	0,65	0,78	1,18	0,32
КБП <sub>корень</sub>	0,93	0,58	0,71	1,00	5,08	2,23
ПП2						
М <sub>все раст</sub>	15503 ± 2000	417,42 ± 25,36*	41,57 ± 15,10	18,94 ± 2,01	95,15 ± 10,23	11,23 ± 1,00
М <sub>надз</sub>	1155 ± 256	29,62 ± 3,58	24,39 ± 5,12	7,11 ± 1,15	17,93 ± 3,70	1,36 ± 0,05
М <sub>корень</sub>	14347 ± 1470	387,79 ± 70,25	17,18 ± 3,18	11,83 ± 2,00	77,22 ± 3,15	9,87 ± 2,00
КБП <sub>раст</sub>	2,13	4,76	4,65	3,86	23,80	6,61

Окончание табл. 3						
Элемент	Fe	Mn	Zn	Cu	Ni	Pb
мг/кг						
КБП <sub>надз</sub>	0,16	0,34	2,73	1,45	4,48	0,80
КБП <sub>корень</sub>	1,98	4,42	1,92	2,41	19,32	5,81
ППЗ						
М <sub>все раст</sub>	32905 ± 2589*	162,26 ± 15,20	249,41 ± 35,00*	70,52 ± 15,12*	559,45 ± 63,00*	477,71 ± 30,30*
М <sub>надз</sub>	1471 ± 300	37,52 ± 7,20	21,00 ± 3,58	5,32 ± 1,00	6,01 ± 1,06	2,69 ± 0,63
М <sub>корень</sub>	31433 ± 5000	124,74 ± 10,60	228,41 ± 25,80	65,20 ± 7,78	553,44 ± 80,10	475,01 ± 45,20
КБП <sub>раст</sub>	2,50	1,26	3,94	2,26	24,24	27,70
КБП <sub>надз</sub>	0,11	0,29	0,33	0,17	0,26	0,16
КБП <sub>корень</sub>	2,39	0,97	3,61	2,09	23,98	27,54
ПДК <sup>1</sup>	> 500	300-500	>100	20-100	10-100	20-300

\* данные, представленные со звездочкой, достоверно различаются по ПП согласно Fisher's LSD test. ( $p \leq 0,05$ )

<sup>1</sup> – предельно допустимая концентрация содержания элементов в растениях, мг/кг [12].

**Никель.** Астра солончаковая накапливала очень высокие количества никеля 66–560 мг/кг, максимально на ППЗ. Астра – гипераккумулятор никеля на литорали Белого моря. КБП никеля были очень высокие 6,27–24,24. Никель в растениях превышал критический уровень у растений в 6–56 раз. При этом корень также вмещал 90% всего растительного никеля (табл. 3).

**Свинец.** 11–478 мг/кг свинца содержалось в растениях астры. На ППЗ превышение критического уровня составило 24 ПДК. Астра – гипераккумулятор свинца на литорали Белого моря. КБП 2,55–27,70. И 90% растительного свинца накапливали корни астры (табл. 3).

Таким образом, астра солончаковая активно накапливает металлы (КБП > 1). Средний ряд (ПП1–ППЗ) накопления металлов Ni (15,84) > Pb (8,21) > Zn (2,93) > Cu (2,82) > Mn (2,08) > Fe (1,71). По абсолютным значениям содержания металлов в растениях можно сделать вывод, что астра – гипераккумулятор железа, никеля и свинца в условиях обитания на литорали Белого моря. Корни растений накапливают 70–90% всех поступающих в растение металлов по сравнению с надземной частью астры солончаковой.

Астра солончаковая (*Aster tripolium* L.) доминирует в растительном покрове литорали Белого моря в пределах изученных пробных площадей в окрестностях п. Рабочеостровск [7]. Растения астры обитают в условиях значительного загрязнения морской воды нитратами до 2,1–0,9 ПДК, железом до 6,4–0,8 ПДК, никелем до 17,7–14,8 ПДК и свинцом 9,8–2,4 ПДК (табл. 1).

Литоральные грунты не загрязнены тяжелыми металлами. Однако можно отметить, что на ППЗ (зона порта) установлены уровни металлов, превышающие фоновые значения и равные 0,4 ОДК цинка, 0,9 ОДК меди, 0,8 ОДК никеля и 0,6 ОДК свинца (табл. 2).

Поступление загрязняющих веществ в Белое море происходит с течениями крупных рек Северо-Запада России (Кемь, Северная Двина, Кереть, Онега, Нижний Выг, Верхний Выг) [11]. Так, объем сбрасываемых сточных вод в поверхностные водные объекты бассейна Белого моря в 2019 г. составил 73,87 млн м<sup>3</sup> (в 2018 г. – 70,13 млн м<sup>3</sup>), в том числе 14,98 млн м<sup>3</sup> приходится на сбросы горнодобывающего металлургического предприятия АО «Карельский окатыш». Основные загрязняющие вещества выбросов АО «Карельский окатыш» – сернистый ангидрид, железо, никель, марганец, свинец, цинк. Согласно данным Государственного доклада о состоянии окружающей среды Республики Карелия, наибольшую массу в составе загрязняющих веществ, сбрасываемых в водоемы бассейна Белого моря в 2019 г., составляют: лигнин сульфатный (3014,88 т), калий (1982,43 т), нитраты (1446,41 т), магний (601,51 т), натрий (524,35 т), железо (30,51 т), нефтепродукты (11,92 т), никель (898,64 кг) [1].

Растения *Aster tripolium* L. активно накапливают тяжелые металлы из среды, о чем свидетельствует КБП > 1 (табл. 3). Средний ряд (ПП1–ППЗ) накопления металлов Ni (15,84) > Pb (8,21) > Zn (2,93) > Cu (2,82) > Mn (2,08) > Fe (1,71). Растение *Aster tripolium* – ги-

пераккумулятор железа, никеля и свинца, так как накапливает очень высокие уровни железа (15–32 г/кг), никеля (66–560 мг/кг) и свинца (11–478 мг/кг), особенно на ППЗ (зона порта). Содержание железа в тканях астры в тысячи раз превышает содержание других элементов. Считается, что если растения накапливают металл до значений более чем 1000 мг/кг, то его относят к гипераккумуляторам, а если до значений < 500 мг/кг – то к негипераккумуляторам или вторичным аккумуляторам этого металла [13].

Ранее нами было показано, что растения *Plantago maritima* L. и *Triglochin maritima* L., обитающие на литорали Белого моря в районе п. Кереть, также накапливают железо до уровней 13–22 г/кг соответственно [14]. Есть факты, что галофиты *Salicornia europaea*, *Suaeda maritima*, *Salsola soda* и *Halimione portulacoides* с засоленных морских территорий могут накапливать до 2,3 г/кг железа всем растением и в корнях 1,3 г/кг [6]. Хорошо известно, что клеточная стенка растений может депонировать тяжелые металлы [6, 14]. Возможно, связывание атомов железа клеточной стенкой корней и листьев астры солончаковой может повышать её жесткость, обеспечивая повышение прочности органов в условиях наибольшей приливно-отливной динамики моря.

Корни растений *Aster tripolium* L. накапливают 70–90% всех поступающих в растение металлов по сравнению с наземной частью астры солончаковой. Хорошо известно, что именно корневая система и ее ткани – первый барьер на пути загрязняющих веществ [3, 15]. Адаптация растений на уровне организма направлена на иммобилизацию металлов в корнях, чтобы защитить от токсического действия металлов репродуктивные органы и семена [15]. Следует отметить, что астра солончаковая – корневищное растение, накапливает металлы в корне в течение всей жизни растения, в то время как наземная часть растений отмирает каждый год и её минеральные элементы питают грунты литорали и берега в виде выбросов.

Таким образом, в условиях загрязнения среды обитания нитратами, железом, никелем и свинцом на литорали Белого моря растения-галофиты *Aster tripolium* L. активно накапливают металлы, в основном корнями, и могут рассматриваться как гипераккумуляторы железа, никеля и свинца.

#### Список литературы / References

1. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2019 г. (Министерство при-

родных ресурсов и экологии Республики Карелия) / Под ред. Громцева А.Н. Петрозаводск, 2020. 248 с. // ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.krc.karelia.ru/publ.php?id=m166&plang=r> (дата обращения: 12.10.2021).

State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2019 (Ministry of Natural Resources and Ecology of the Republic of Karelia) / Ed. A.N. Gromtsev. Petrozavodsk, 2020. 248 p. // FITS «Karel'skiy nauchnyy tsentr Rossiyskoy akademii nauk». [Electronic resource]. URL: <http://www.krc.karelia.ru/publ.php?id=m166&plang=r>. (date of access: 12.10.2021) (in Russian).

2. Salt D.E., Smith R.D., Raskin L. Phytoremediation. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology. 1998. Vol. 49 (1). P. 643–668. DOI: 10.1146/annurev.arplant.49.1.643.

3. Van Osten M.J., Maggio A. Functional biology of halophytes in the phytoremediation of heavy metal contaminated soils. Environmental and Experimental Botany. 2015. Vol. 111. P. 135–146. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2014.11.010.

4. Rabhi M., Ferchichi S., Jouini J., Hamrouni M.H., Koyro H.-W., Ranieri A., Abdelly C., Smaoui A. Phytodesalination of a salt-affected soil with the halophyte *Sesuvium portulacastrum* L. to arrange in advance the requirements for the successful growth of a glycophytic crop. Bioresour. Technol. 2010. Vol. 101. P. 6822–6828. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.03.097.

5. Alatorre E.B., Shabala S., Chen Z., Pottosin I. Reduced tonoplast FV and SV channels activity is essential for conferring salinity tolerance in a facultative halophyte. *Chenopodium quinoa*. Plant Physiol. 2013. P. 113–126. DOI: 10.1104/pp.113.216572.

6. Markovskaya E., Terebova E., Androsova V., Pavlova M., Taskina K. Ecological and physiological features of metal accumulation of halophytic plants on the White Sea coast. Handbook of bioremediation: Physiological, Molecular and Biotechnological Interventions. India, 2020. P. 295–327.

7. Tseyts M.A., Dobrynin D.V. Classification of Marsh Soils in Russia. Eurasian Soil Science. 2005. Vol. 38. № 1. P. 44–48.

8. Таскина К.Б. Динамика приморской растительности на западном побережье Белого моря (окрестности пос. Рабочееостровск) // Карелия глазами ученых: основные результаты экспедиционной деятельности (2019). 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.karelia.ru/book.shtml?id=47002>. (дата обращения: 12.10.2021).

Taskina K.B. The dynamics of coastal vegetation on the western coast of the White Sea (environs of the settlement of Rabocheostrovsk) // Kareliya glazami uchenyh: osnovnye rezultaty ekspeditsionnoy deyatelnosti (2019). 2020. [Electronic resource]. URL: <https://elibrary.karelia.ru/book.shtml?id=47002>. (date of access: 12.10.2021) (in Russian).

9. Морозова К.В., Гуляева Е.Н., Марковская Е.Ф. Анатомо-морфологическая характеристика листьев Астры солончаковой (*Aster tripolium* L.) на побережье Белого моря // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2014. № 8. Т. 2. С. 21–26.

Morozova K.V., Gulyaeva E.N., Markovskaya E.F. Anatomical and morphological characteristics of the leaves of sea-shore aster (*Aster tripolium* L.) on the coast of the White Sea // Uchenyye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. 2014. № 8. Vol. 2. P. 21–26 (in Russian).

10. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 года № 552 // Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (дата обращения: 12.10.2021).

Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation of December 13, 2016, № 552 // On the approval of water quality standards for water bodies of fishery value, including the standards of maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery value. Electronic fund of legal and normative-technical docu-

ments. [Electronic resource]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (date of access: 12.10.2021) (in Russian).

11. Ильин Г.В., Усягина И.С., Касаткина Н.Е. Геоэкологическое состояние среды морей Российского сектора Арктики в условиях современных техногенных нагрузок // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. № 2 (21). С. 82–93.

Ilin G.V., Usyagina I.S., Kasatkina N.E. Geoeological state of seas in the environment in the Russian Arctic under the present technogenic stresses // Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN. 2015. № 2 (21). P. 82–93 (in Russian).

12. Pendas A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th edition. Boca Raton, FL, USA: CRC Press/Taylor & Francis Group. 2010. 548 p. DOI: 10.1201/b10158.

13. Naila A., Meerdink G., Jayasena V., Sulaiman A.Z., Ajit A.B., Graziella Berta, G. A review on global metal accumulators-mechanism, enhancement, commercial application, and research trend. Environmental Science and Pollution Research. 2019. Vol. 26. P. 26449–26471. DOI: 10.1007/s11356-019-05992-4.

14. Terebova E., Markovskaya E., Androsova V., Pavlova M., Oreshnikova N. Cell wall functional activity and metal accumulation of halophytic plant species *Plantago maritima* and *Triglochin maritima* on the White Sea littoral zone (NW Russia). Czech Polar Reports. 2020. Vol. 10 (2). P. 169–188.

15. Yadav S. Heavy Metals Toxicity in Plants: An Overview on the Role of Glutathione and Phytochelatins in Heavy Metal Stress Tolerance of Plants. South African Journal of Botany. 2010. Vol. 76 (2). P. 167–179. DOI: 10.1016/j.sajb.2009.10.007.