



УДК [574.24:546+504.73.054+581.526.52](571.63)

## Аккумуляция тяжёлых металлов различными видами галофитов супралиторали морских берегов на юге Приморского края

Н. М. Воронкова, Е. В. Бурковская, Я. О. Тимофеева

Биолого-почвенный институт ДВО РАН, Владивосток  
E-mail: [voronkova@biosoil.ru](mailto:voronkova@biosoil.ru)

**Аннотация.** Проведено изучение интенсивности накопления тяжёлых металлов (Cu, Pb, Cd) листьями пяти видов галофитов супралиторали морских берегов на юге Дальнего Востока России. Показано, что ответная реакция растений видоспецифична. В соответствии с показателями накопления в листьях данных элементов в конце вегетации, исследуемый нами ряд галофитов представлен в порядке снижения содержания этих элементов следующим образом: для свинца – *Glehnia littoralis* > *Suaeda heteroptera* > *Artemisia stelleriana* > *Salicornia europaea* > *Salsola komarovii*, для кадмия – *Salicornia europaea* > *Glehnia littoralis* > *Artemisia stelleriana* > *Suaeda heteroptera* > *Salsola komarovii*. Медь наиболее активно накапливалась в листьях *Salsola komarovii*. У остальных трёх видов уровень содержания этого элемента к концу вегетации был примерно одинаков, но значительно ниже, чем у *Salsola komarovii*. Накопление тяжёлых металлов в установленных концентрациях не препятствовало завершению онтогенеза и формированию жизнеспособных семян.

**Ключевые слова:** галофиты, морские берега, Cu, Pb, Cd, накопление, жизнеспособность семян.

### Введение

В мировой практике значительно возрос интерес к биоаккумуляции химических элементов в растениях при их взаимодействиях с различными стрессовыми факторами среды [1; 10; 17]. С увеличением антропогенной нагрузки существенно возрастают уровень и масштабы загрязнения природной среды тяжёлыми металлами. В южном Приморье в сфере загрязнения оказываются и морские воды с прилегающими почвами берегов. Среди источников поступления тяжёлых металлов в океанические воды антропогенные являются приоритетными. Так, для свинца доля антропогенного стока составляет 92 %, для кадмия – 50 % [6].

Морские воды оказывают непосредственное влияние на почвенный покров маршевых участков узких полос равнинных морских берегов. Примитивные почвы песчаных и галечных участков маршей, береговых валов и дюн в некоторых случаях представляют собой практически чисто минеральные субстраты. В такой ситуации море влияет на растительность при периодическом приливном затоплении, а на маритимные болотные почвы – через грунтовые воды и при импультверизации [16]. Кроме того, одним из источников тяжёлых металлов здесь являются прибрежные территории, испытывающие рекреационные нагрузки от автомо-

бильного транспорта, особенно летом в период вегетации растений.

По направлению от континентальных районов к океаническому побережью эколого-климатический режим становится всё более жёстким. В прибрежной полосе переменчивы все экологические факторы. Для многих растений, выходящих на побережье, морские берега являются зоной испытания на жизнеспособность, в связи с чем прибрежные зоны часто рассматриваются как естественные ценозы с пониженной эколого-ценотической замкнутостью. Тем не менее, многие представители галофильной растительности южного Приморья обладают высокой адаптационной способностью [7; 9] и формируют жизнеспособные семена [3], хотя наличие тяжёлых металлов в прибрежной полосе ещё более усугубляет естественные стрессовые условия обитания.

Целью настоящей работы является оценка способности к накоплению тяжёлых металлов на уровне аккумуляции в листьях разными видами растений-галофитов, произрастающих в супралиторали морских берегов юга Дальнего Востока России (Приморский край).

### Материалы и методы

Сбор опытного растительного материала проведён в 2010 г. в южном Приморье в эстуарных зонах на песчано-галечных и заболочен-

ных участках талассосолей зал. Угловой (близ с. Прохладное) и бух. Суходол (близ с. Речица) в составе зал. Петра Великого. Поскольку вегетативные органы накапливают больше загрязняющих веществ, чем репродуктивные [12], объектом исследования были выбраны листья пяти видов галофитов, наиболее характерных для супралиторальных зон морских берегов. Тяжёлые металлы (свинец (Pb), кадмий (Cd), медь (Cu)) были определены в листьях солероса европейского *Salicornia europaea* L. (Chenopodiaceae), сведы разнокрылой *Suaeda heteroptera* Kitag. (Chenopodiaceae), солянки Комарова *Salsola komarovii* Pjin (Chenopodiaceae), глени приморской *Glehnia littoralis* Fr. Schmidt ex Miq., (Ariaceae), полыни Стеллера *Artemisia stelleriana* Bess. (Asteraceae) в конце вегетационного периода. Виды семейства Chenopodiaceae относятся к эугалофитам, *A. stelleriana* – к гликогалофитам, *G. littoralis* – к криногалофитам [7].

Для определения содержания тяжёлых металлов растительный материал предварительно высушивали и измельчали до порошкообразного состояния. Экстракцию элементов из высушенных растительных образцов листьев проводили методом мокрого озоления [8]. Определение элементного состава растений и морской воды (РД 52.10.243–92) выполнено на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Optima 2100 DV («Perkin Elmer», США) в центральной лаборатории ОАО «Приморгеология».

Проращивание семян проводили в условиях естественного освещения в чашках Петри на влажной фильтровальной бумаге при температуре 18–26 °С. Мерикарпии *G. littoralis* проращивали без плодовых оболочек в режиме переменной положительной температуры (18–26 °С (1 мес) – 2 °С (1,5 мес) – 18–26 °С (0,5 мес). Подсчёт проросших семян вели ежедневно. Количество проросших семян (в %) рассчитывали от числа заложенных на проращивание.

Полученные в экспериментах цифровые данные представлены как средние арифметические и их стандартные ошибки, полученные в трёх повторностях по 50 семян в каждой, при определении тяжёлых металлов каждая биоло-

гическая повторность формировалась как усреднённая проба, состоявшая из листьев 10 экз. растения каждого вида.

Для проб от растений, подвергавшихся в природных условиях импультверизации морской водой, наружную отмывку солей не проводили.

Для удобства изложения материала нескрывающиеся плоды у *A. stelleriana* (семянки) и *G. littoralis* (мерикарпии), как посевные единицы, и фотосинтезирующие органы (стилоиды) у *S. europaea*, представляющие собой сросшийся со стеблем лист, условно именуется в данной статье семенами и листом соответственно.

Латинские названия растений приводятся согласно сводке «Сосудистые растения советского Дальнего Востока» [13].

### Результаты и обсуждение

В акваториях дальневосточных морей России самому мощному антропогенному воздействию подвержен залив Петра Великого Японского моря. Среди основных загрязняющих элементов в морской воде обнаружены и тяжёлые металлы, в том числе Cu, Cd, Pb [15]. Прибрежные территории, где отбирались растения, непосредственно испытывают воздействие моря. Время от времени они заливаются и подвергаются почти постоянному процессу импультверизации морской водой, поэтому накопление галофитами тяжёлых металлов прежде всего связано с содержанием последних в морской воде.

В различных локальных зонах прибрежных вод концентрация тяжёлых металлов неоднородна. Известно, что в пределах зал. Угловой их концентрация в 90-е гг. прошлого века в зависимости от места определения была высокой и варьировала очень широко [5]. В растворённом состоянии в поверхностном слое прибрежных вод концентрация Cu была определена в пределах от 0,46 до 5,21 мкг/л (среднее 2,59), Cd – от 0,05 до 0,85 (среднее 0,41), Pb – от 0,11 до 5,53 (среднее 2,78).

Полученные нами в 2010 г. данные количественного химического анализа прибрежной морской воды в районе отбора проб в зал. Угловой представлены в табл. 1.

Таблица 1

Содержание Cu, Cd, Pb в растворённой форме в морской воде зал. Угловой (зал. Петра Великого, Японское море), мг/л

Элемент	Содержание в прибрежной морской воде зал. Угловой	Содержание в чистой океанической воде (по А. П. Виноградову [2])
Cu	0,0028	0,003
Cd	0,0002	0,0001
Pb	0,0022	0,00003

Интегральный коэффициент концентрации тяжёлых металлов в прибрежных водах относительно океанических вод, рассчитанный, как сумма их отношений, поделённая на количество исследованных элементов [5], в районе отбора исследуемых растений составил более 25 условных единиц. Загрязнённость прибрежных вод на данном участке высока, поскольку при значении коэффициента более единицы воды считаются загрязнёнными выше океанического фона. Наиболее значимый вклад в загрязнение вносят Pb и Cd. По мнению Международного комитета по охране окружающей среды, именно свинец и кадмий входят в перечень наиболее токсичных для биоты элементов, медь менее опасна. Источники загрязнения идентифицировать сложно. Таковыми могут быть технологические сточные воды и, возможно, сток с сельскохозяйственных территорий. Установлено, что Pb и Cd наиболее распространены в агроэкосистемах Дальнего Востока и часто встречаются при интенсивном использовании фосфорных, а также нетрадиционных удобрений [4]. Попадая в природные воды, они вносят определённый вклад в загрязнение эстуарных зон побережья. Среди наиболее вероятных источников интенсивного накопления тяжёлых металлов в листьях растений можно считать воздушные поллютанты при сухом и мокром выпадении. Последнее характерно для Дальнего Востока России в связи с муссонным климатом. Кроме того, повышенный уровень Pb может быть связан с высокой интенсивностью транспортного потока на проходящей близ прибрежной полосы автомагистрали.

Различные виды галофитов как аридных, так и гумидных территорий имеют определённый набор адаптивных признаков, обеспечивающих их выживание в условиях повышенной засоленности. На основании анализа полученных нами анатомических и мезоструктурных характеристик листьев галофитов [7] представленные в данной статье виды отнесены к эу- (*Salicornia europaea*, *Suaeda heteroptera*, *Salsola komarovii*), крино- (*G. littoralis*) и гликогалофитам (*A. stelleriana*). Соответственно соленакопление, солевыведение и солеисключение, характерное для этих групп, относится к избытку солей натрия и определяет их уровень в растении.

Известно, что накопление тяжёлых металлов в растениях зависит от ряда биологических

и эдафических факторов [17–21 и др.]. Что касается галофитов, некоторые виды (например, факультативный галофит *Mesembryanthemum crystallinum* L.) весьма устойчивы к высоким дозам тяжёлых металлов, в частности Cu и Zn [14]. На рис. 1 представлено сравнительное содержание отдельных элементов в листьях исследованных видов. В конце вегетации уровень накопления Cu в расчёте на единицу сухой массы в листьях *S. komarovii* в 3–4 раза выше по сравнению с остальными видами (*G. littoralis*, *A. stelleriana*, *S. europaea*, *S. heteroptera*), имеющими примерно одинаковое содержание данного элемента. В соответствии с показателями накопления двух других элементов исследуемый нами ряд галофитов представлен в порядке снижения содержания этих элементов следующим образом: для Pb – *Glehnia littoralis* > *Suaeda heteroptera* > *Artemisia stelleriana* > *Salicornia europaea* > *Salsola komarovii*, для Cd – *Salicornia europaea* > *Glehnia littoralis* > *Artemisia stelleriana* > *Suaeda heteroptera* > *Salsola komarovii*.

Уровень концентрации элементов в листьях показывает следующую последовательность соотношений для видов изученных растений (рис. 2): *G. littoralis*, *A. stelleriana*, *S. europaea*, *S. heteroptera* – Pb > Cu > Cd, *S. komarovii* – Cu > Pb > Cd.

Наименьший уровень накопления в растениях всех видов характерен для Cd, наибольший (за исключением *S. komarovii*) – для Pb, при этом концентрации элементов для растений разных видов различны.

Считают, что Cd и Pb оказывают сильное токсическое действие на растения [11]. Изученные экземпляры галофитов визуально не имели некротических повреждений и сформировали жизнеспособные семена, о чём можно судить по показателям их прорастания (табл. 2).

Три вида имели высокую всхожесть, а два – удовлетворительную. Семена четырёх видов (кроме *G. littoralis*), имеющие незатруднённое прорастание, прорастали быстро и активно. Известно, что Pb и Cd локализуются в клеточных оболочках кожуры семян и не проникают в зародыши при проращивании на растворах солей этих металлов [22; 23]. Вероятно, барьерная функция семенной кожуры у вышеупомянутых видов реализуется наиболее успешно.

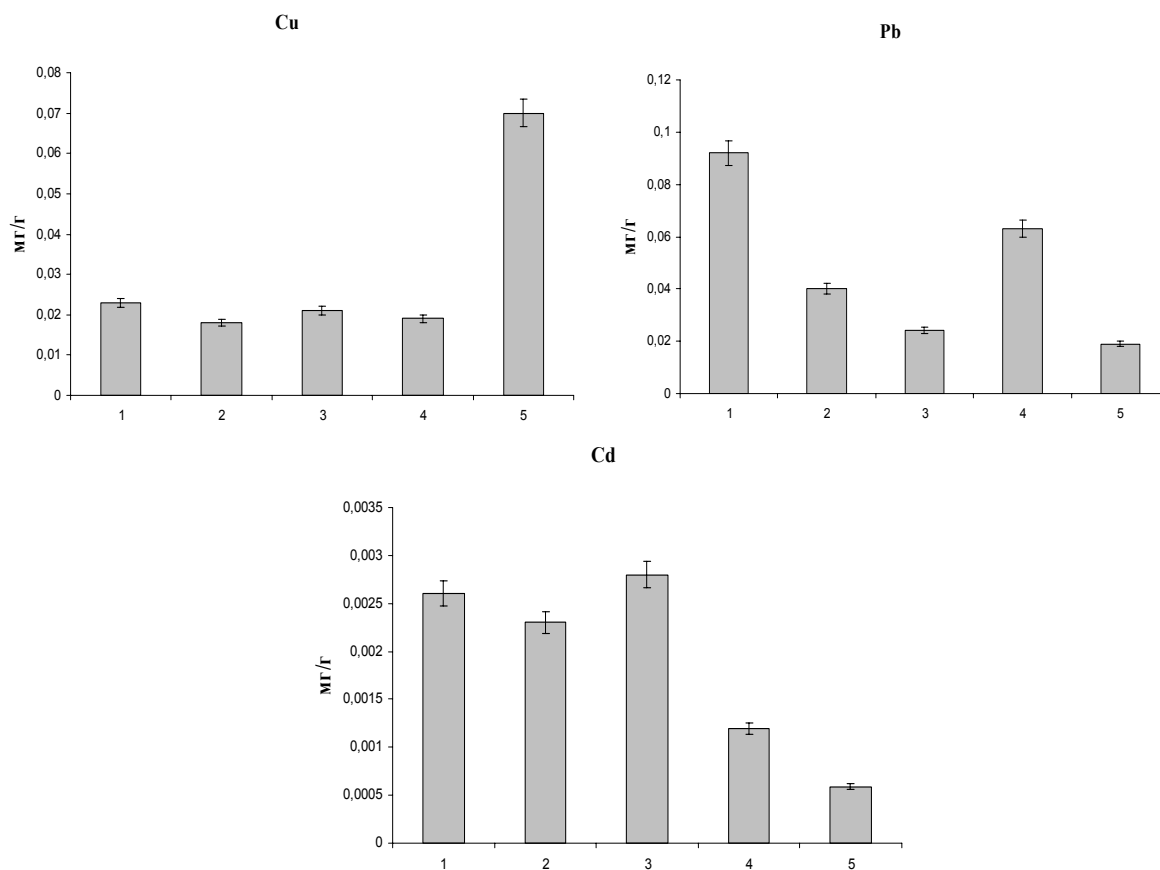


Рис. 1. Содержание тяжёлых металлов (мг/г сухой массы) в листьях галофитов, произрастающих в супралиторали берега зал. Угловой (зал. Петра Великого, Японское море) в конце вегетационного сезона. 1 – *Glehnia littoralis*, 2 – *Artemisia stelleriana*, 3 – *Salicornia europaea*, 4 – *Suaeda heteroptera*, 5 – *Salsola komarovii*

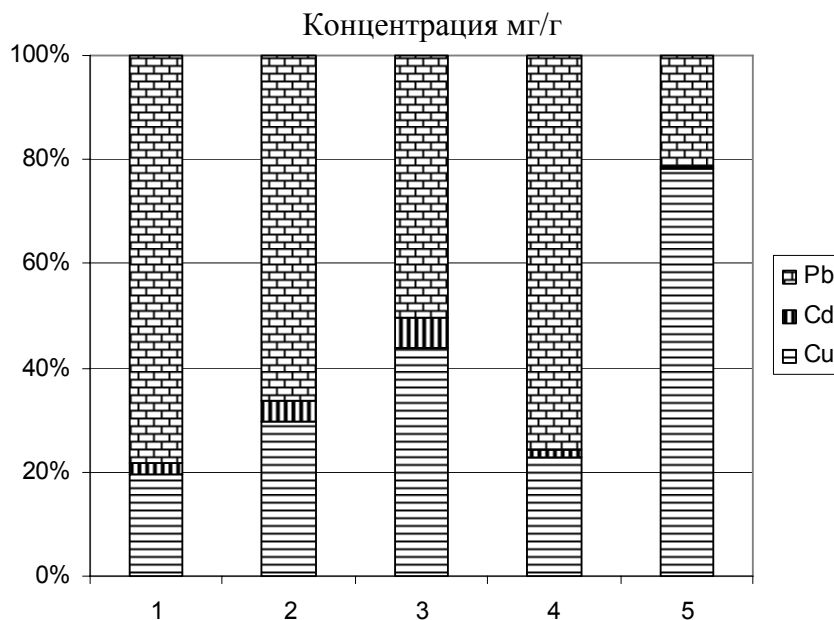


Рис. 2. Процентное соотношение содержания Pb, Cd и Cu в листьях галофитов, произрастающих в супралиторали берега зал. Угловой (зал. Петра Великого, Японское море) в конце вегетационного сезона. 1 – *G. littoralis*; 2 – *A. stelleriana*; 3 – *S. europaea*; 4 – *S. heteroptera*; 5 – *S. komarovii*

Таблица 2

Показатели прорастания семян галофитов, произрастающих в супралиторали берега зал. Угловой (зал. Петра Великого, Японское море)

Вид	T <sub>0</sub> , сут	T <sub>50</sub> , сут	Всхожесть*, %
<i>Salicornia europaea</i>	1	3	51±2
<i>Suaeda heteroptera</i>	1	2	92±5
<i>Salsola komarovii</i>	1	2	88±1
<i>Glehnia littoralis</i> **	6	8	47±9
<i>Artemisia stelleriana</i>	3	4	83±7

Примечание: T<sub>0</sub> – число суток до начала прорастания; T<sub>50</sub> – число суток, в течение которых всхожесть достигла 50 %; \* – среднее значение из трёх повторностей ± ошибка среднего; \*\* – при расчёте T<sub>0</sub> и T<sub>50</sub> учтён только период после стратификации.

### Выводы

1. Произрастая в стрессовых условиях засоления, галофиты супралиторали морских берегов значительно различаются по способности к накоплению тяжёлых металлов в тканях.

2. В отношении Pb, Cu, Cd ответная реакция растений видоспецифична. Свинец наиболее активно накапливали листья *Glehnia littoralis* и *Suaeda heteroptera*, кадмий – *Glehnia littoralis*, *Artemisia stelleriana* и *Salicornia europaea*, медь – *Salsola komarovii*.

3. Закономерной зависимости от принадлежности видов к эу-, глико- и криногалофитам для данных элементов не найдено.

4. Накопление тяжёлых металлов в обнаруженных концентрациях не препятствовало завершению онтогенеза изучаемых галофитов и формированию жизнеспособных семян.

### Литература

1. Битюцкий Н. П. Необходимые микроэлементы растений / Н. П. Битюцкий. – СПб. : Дзан, 2005. – 256 с.
2. Виноградов А. П. Введение в геохимию океана / А. П. Виноградов. – М. : Наука, 1967. – 215 с.
3. Воронкова Н. М. Видовая специфика реакции семян прибрежных растений на колебания солёности морской воды / Н. М. Воронкова, А. Б. Холина // Экология. – 2010. – № 3. – С. 163–167.
4. Голов В. И. Круговорот серы и микроэлементов в основных агроэкосистемах Дальнего Востока / В. И. Голов. – Владивосток : Дальнаука, 2004. – 316 с.
5. Долговременная программа охраны природы и рационального использования природных ресурсов Приморского края до 2005 г. (Экологическая программа). Ч. 2. – Владивосток : ДВО РАН, 1992. – 276 с.
6. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю. А. Израэль. – М. : Гидрометеиздат, 1984. – 560 с.
7. Морфологические и биологические особенности растений в связи с адаптацией к условиям

морских побережий / Н. М. Воронкова [и др.] // Экология. – 2008. – № 1. – С. 3–9.

8. Практикум по агрохимии / под ред. В. Г. Минеева. – М. : Изд. МГУ, 1989. – 303 с.

9. Пробатова Н. С. Сосудистые растения в контактной зоне «континент – океан» / Н. С. Пробатова, В. П. Селедец // Вест. ДВО РАН. – 1999. – № 3. – С. 80–92.

10. Пути адаптации ценопопуляций одуванчика лекарственного к длительному химическому и радиационному воздействию / В. Н. Позолотина [и др.] // Экология. – 2006. – № 6. – С. 440–445.

11. Серегин И. В. Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения / И. В. Серегин, В. Б. Иванов // Физиология растений. – 2001. – Т. 48. – № 4. – С. 606–630.

12. Солнцева М. П. Влияние промышленного и транспортного загрязнения среды на репродукцию семенных растений / М. П. Солнцева, К. П. Глазунова // Журн. общ. биологии. – 2010. – Т. 71, № 2. – С. 163–175.

13. Сосудистые растения советского Дальнего Востока. – Л. : Наука, 1987. – Т. 2. – 446 с.; Л. : Наука, 1988. – Т. 3. – 421 с.; СПб. : Наука, 1992. – Т. 6. – 428 с.

14. Холодова В. П. Адаптация к высоким концентрациям солей меди и цинка растений хрустальной травки и возможность их использования в целях фиторемедиации / В. П. Холодова, К. С. Волков, Вл. В. Кузнецов // Физиология растений. – 2005. – Т. 52, № 6. – С. 848–858.

15. Христофорова Н. К. Изменение фоновых уровней тяжёлых металлов в морской среде / Н. К. Христофорова, С. И. Коженкова // Докл. АН. – 2000. – Т. 374, № 1. – С. 136–138.

16. Шляхов С. А. Химические и физико-химические свойства равнинных почв тихоокеанского побережья России / С. А. Шляхов, Н. М. Костенков // Почвоведение. – 1999. – № 9. – С. 1085–1095.

17. Bargagli R. Trace elements in terrestrial plants: an ecological approach to biomonitoring and biorecovery / R. Bargagli. – Berlin : Springer-Verlag, 1998. – 344 p.

18. Bergkvist B. Fluxes of Cu, Zn, Pb, Cd, Cr and Ni in temperate forest ecosystems. A literature review / B. Bergkvist, L. Folkesson, D. Berggren // Water Air Soil Pollut. – 1989. – Vol. 47. – P. 217–286.

19. Chamberlain A. C. Fallout of Pb and uptake by crops / A. C. Chamberlain // *Atmos. Environ.* – 1983. – Vol. 17. – P. 693–706.

20. Deu M. Seasonal variations of foliar metal content in three fruit tree species / M. Deu, K. H. Kreeb // *Plants as biomonitors. Indicators for heavy metals in the terrestrial environment.* – Weinheim : VCH, 1993. – P. 577–591.

21. Hovmand M.F. Plant uptake of airborne cadmium / M. F. Hovmand, J. C. Tjell, H. Mosbaek // *Environ Pollut.* – 1983. – Vol. 30. – P. 27–38.

22. Lane S. D. Ultrastructural examination of lead localization in germinating seeds of *Raphanus sativus* / S. D. Lane, E. S. Martin // *Z. Pflanzenphysiol.* – 1982. – Bd. 107. – S. 33–40.

23. Root growth responses to lead in young maize seedlings / N. V. Obroucheva [et al.] // *Plant Soil.* – 1998. – Vol. 200. – P. 55–61.

## Heavy metals accumulation by different types of halophytes from coastal supralittoral on the South of Primorye

N. M. Voronkova, E. V. Burkovskaya, Ya. O. Timofeeva

Institute of Biology and Soil Science FEB RAS, Vladivostok

**Abstract.** The intensity of heavy metals accumulation (Cu, Pb, Cd) by leaves of 5 species halophytes from supralittorals zone in the south coast of Russian Far East have been studied. It is shown that the response of plant species-specific. The leaves *Glehnia littoralis* and *Suaeda heteroptera* accumulated Pb most actively, Cd accumulated leaves *Glehnia littoralis*, *Artemisia stelleriana* and *Salicornia europaea*, Cu accumulated *Salsola komarovii*. Accumulation of heavy metals does not prevent the completion of ontogeny and formation of viable seeds in fixed concentrations.

**Key words:** halophyte, sea coast, Cu, Pb, Cd, accumulation, seed viability

*Воронкова Нина Михайловна*  
Биолого-почвенный институт ДВО РАН  
690022, г. Владивосток, пр. 100-летия  
Владивостока, 159  
кандидат биологических наук,  
старший научный сотрудник  
тел. (423) 232–12–47  
E-mail: voronkova@biosoil.ru

*Voronkova Nina Mikhailovna*  
Institute of Biology and Soil Science FEB RAS  
159 Stoletiya Vladivostoka Av., Vladivostok 690022  
Ph. D. in Biology  
senior research scientist  
phone: (423) 232–12–47  
E-mail: voronkova@biosoil.ru

*Бурковская Елена Викторовна*  
Биолого-почвенный институт ДВО РАН  
690022, г. Владивосток, пр. 100-летия  
Владивостока, 159  
научный сотрудник  
тел. (423) 231–40–72  
E-mail burkovskaya@ibss.dvo.ru

*Burkovskaya Elena Viktorovna*  
Institute of Biology and Soil Science FEB RAS  
159 Stoletiya Vladivostoka Av., Vladivostok  
research scientist  
phone: (423) 231–40–72  
E-mail: burkovskaya@ibss.dvo.ru

*Тимофеева Яна Олеговна*  
Биолого-почвенный институт ДВО РАН  
690022, г. Владивосток, пр. 100-летия  
Владивостока, 159  
кандидат биологических наук,  
научный сотрудник  
тел. (423) 290–87–45  
E-mail: : timofeeva@biosoil.ru

*Timofeeva Yana Olegovna*  
Institute of Biology and Soil Science FEB RAS  
159 Stoletiya Vladivostoka Av., Vladivostok  
Ph. D. in Biology, research scientist  
phone: (423) 290–87–45  
E-mail: timofeeva@biosoil.ru