

УДК 502/504:631.6

А.И. ГОЛОВАНОВ, С.А. МАКСИМОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ ПРИ МЕЛИОРАЦИИ И РЕКУЛЬТИВАЦИИ ЗЕМЕЛЬ¹

Предлагается использовать теорию биогеохимических барьеров для обоснования приемов мелиорации и рекультивации земель. В качестве примеров рассмотрено орошение земель сточными водами животноводческих комплексов, при котором для устранения загрязнения подземных и речных вод рекомендуется создание биогеохимического барьера потоку нитратов в виде посева трав ниже по направлению течения, шириной примерно равного орошаемому участку. Для освоения земель с комплексным почвенным покровом рекомендуется «сухой» дренаж на площади, равной днищу субдоминантного урочища. Практический 30-летний опыт мелиорации земель Палассовской оросительно-обводнительной системы показал, что сплошное орошение больших массивов при отсутствии естественной дренированности оказалось невозможным. Надобности в сплошном орошении подобных пятнисто засоленных земель – со сложным мезо- и микрорельефом, почти не обеспеченных естественным дренажем, мы не видим по причине его малой эффективности и экологической опасности. Для обоснования мероприятий предотвращающего вторичного засоления земель целесообразно использование понятия галогеохимической ёмкости или солеёмкости, т.е. установившихся равновесных запасов солей, сформировавшихся при длительных стационарных или квазистационарных внешних факторах: погодных, гидрогеологических, почвенных, организационно-хозяйственных. Смоделирована длительная многолетняя динамика солеёмкости земель Колочной степи Западной Сибири, формирующаяся потоком подземных вод с предгорий Алтая. Понятие солеёмкости создает методологическую основу для мелиорации засоленных почв, которая должна сводиться к управлению этой солеёмкостью, а не к разовому удалению солей, например, при капитальных промывках без устранения причин, их вызывающих. Создание, разрушение, управление биогеохимическими барьерами раскрывает сущность мелиорации и рекультивации земель, дополняет их приемы. Для их применения требуются адекватные математические модели и способы долголетнего прогнозирования природных и антропогенных процессов.

Биогеохимические барьеры, перехват азота, доминантные и субдоминантные урочища, «сухой» дренаж, галогеохимическая ёмкость ландшафта (солеёмкость).

Введение. В 1993 г. кафедра мелиорации и рекультивации земель бывшего МГУП включила в учебный план дисциплину «Ландшафтоведение» [1], в последующем вошедшую в Федеральный государственный образовательный стандарт предложенного нами направления «Природообустройство и водопользование», применяемый всеми вузами России. По состоянию на июнь 2016 г. подготовка кадров по этому направлению ведется по 6 профилям: сельскохозяйственное водоснабжение и водоотведение, КИОВР, природообустройство, машины и оборудование для природообустройства, природоохранное обустройство территорий в 49 вузах России, из которых 17 находятся в подчинении

Минсельхоза РФ, а остальные – в вузах другого подчинения.

Кафедра подготовила учебник «Ландшафтоведение», выдержавший издания в 2005 и в 2015 годах [2, 3]. Были разработаны математические модели влаго- и массопереноса при прогнозировании мелиоративных и рекультивационных процессов, проверенные экспериментально [4]. Стали разрабатываться методы управления биогеохимическими барьерами, раскрывающие суть этих процессов. В статье излагаются некоторые случаи применения теории биогеохимических барьеров.

Материалы и методы исследования. Учение о биогеохимических барьерах является частью геохимии ландшафт-

¹ Материал представлен в форме доклада 01.06.2016 на пленарном заседании конференции «50 лет Программы широкого развития мелиорации земель».

тов, основы которой заложил Б.Б. Польшов в 1934 г., а разработал их теорию А.И. Перельман [5]. Барьеры – это части ландшафта, в которых на относительно коротком расстоянии изменяется скорость миграции химических элементов и, как следствие, происходит избирательное накопление или удаление элементов, скачком изменяется их концентрация.

Геохимические барьеры формируются в результате закономерной пространственной эволюции ландшафтов, а также под воздействием деятельности человека. Различают два типа биогеохимических барьеров: естественные (слои почвы, грунтов, заболоченный луг, замкнутый водоем, болото, кустарник, лес и т.п.) и техногенные (водохранилище, лесополоса, мелиоративная система с оросительной и дренажной сетями, специально организованные инженерно-экологические системы, например, стена в грунте, биоплато в устьях мелиоративных каналов и т.п.). Оба типа барьеров, в зависимости от вида миграции элементов, А.И. Перельман подразделяет на три класса:

- механические (компоненты природы работают как фильтр);
- физико-химические процессы (окислительные, восстановительные, глеевые, сульфидные, сульфатно-карбонатные, щелочные, кислые, испарительные, адсорбционные, термодинамические, гидрофизические и т.п.);
- биогеохимические процессы с удержанием биотой ряда макро- и микроэлементов;
- комплексные барьеры (имеют место при сочетании разных природных барьеров с техногенными на системах мелиорации и рекультивации).

Биогеохимические барьеры характеризуются проводимостью отложений, а также своими ёмкостными свойствами. Имеются классификации барьеров и по другим признакам.

Рассмотрим применение биогеохимических барьеров при орошении земель сточными водами, при освоении земель со сложным рельефом и комплексным почвенным покровом, а также оценку ёмкости этих барьеров.

При утилизации стоков животноводческих предприятий используется полив кормовых культур на ирригационных полях утилизации (ИПУ), на которых достигается эффективная и недорогая очистка сточных вод от биогенов [6]. Хорошо развитый рас-

тительный покров интенсивно поглощает биогены из почвенного слоя (например, азота – до 300...500 кг/га, и др.). При этом нельзя допускать загрязнения подземных и поверхностных вод. Такая технология основана на экономном режиме орошения и на использовании комплекса биогеохимических барьеров, который по нашему предложению дополнен «барьерным» посевом тех же культур (трав), орошаемых чистой водой. Этот посев располагают ниже по течению грунтовых вод (на пойме) и он служит дополнительным средством перехвата оставшегося азота после поля ИПУ, что показано на рисунке 1.

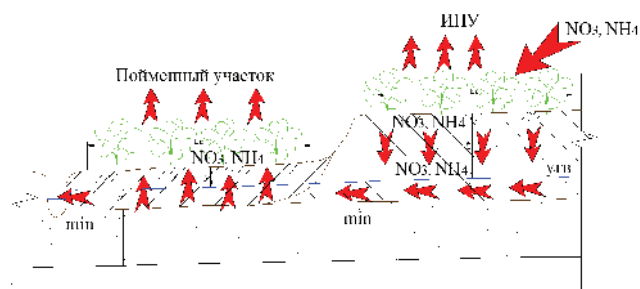


Рис. 1. Схема работы биогеохимического барьера на пойме при орошении сточными водами на ирригационных полях орошения (ИПУ)

Эффективность такого барьера может быть оценена путем математического моделирования совместного передвижения влаги и соединений азота [4, 6]. В этой модели использованы законы передвижения почвенной влаги при неполном и полном влагонасыщении и гидравлическое взаимодействие пластов; рассмотрено передвижение катиона аммония NH_4^+ и нитрат-аниона NO_3^- ; учтены процессы конвекции, диффузии, сорбции и десорбции, аммонификации, нитрификации, денитрификации, поглощения азота корнями растений, приближенно учтено гумусообразование, фиксация азота из воздуха. Используются известные зависимости этих процессов от влажности почвы, её температуры, pH почвенного раствора; применена модель продуктивности растений В.В. Шабанова с учетом их «перекормки» азотом [4].

Результаты исследований. Результаты многолетнего моделирования полива подготовленными животноводческими стоками и оценки «мощности барьера» в условиях Волгоградской области приведены в таблице 1. Почвы на участке темно-кашта-

новые незасоленные, среднесуглинистые, нуждаются в орошении.

Орошаемый участок расположен на высокой, около 10...12 м над уровнем реки, надпойменной террасе с глубиной грунтовых вод около 7 м. Ниже по рельефу (на 5 м) имеется пойменная терраса с глубиной грунтовых вод около 2...3 м, на которой удобно разместить «барьерный» посев трав, орошаемый чистой водой.

Среднегодовалая оросительная норма, по нашей оценке, равна 500 мм, максимальная за 50 лет наблюдений – 900 мм, подача чистого азота на ирригационные поля утилизации ИПУ с оросительной водой в среднем составила 400 кг/га. При экономном режиме полива достигается удовлетворительная утилизация азота посевом многолетних трав, достигающая 90% его подачи. Неперехваченный азот поступает в местную речную сеть, недопустимо загрязняя воду. При подключении предлагаемого барьера в зависимости от его ширины поступление неперехваченного азота в реку существенно

снижается (табл. 1) и при ширине, несколько большей, чем участок ИПУ (в данном примере 800 м) практически устраняется. Заметим, что барьерный посев может быть эффективным при высокой его биологической продуктивности, для чего предусмотрено орошение пресной водой пониженными на 30% нормами, чтобы провоцировать восходящие потоки грунтовых вод, содержащих повышенную концентрацию азота, а также внесение на него азотных удобрений меньшей нормой. В таблице 1 приведены основные статьи баланса азота включая его вынос растительностью, суммарные потери на нитрификацию с учетом аммонификации и денитрификации, а также оценку перехвата оставшегося потока азота,%. Этот перехват существенно зависит от ширины барьера и может быть выбран эколого-экономическим сравнением вариантов, включающим в себя и плату за загрязнение рек. В данном примере показано природоохранное использование и эффективность комплексного биохимического и геофизического барьеров.

Таблица 1

Влияние ширины барьера на перехват азота

Ширина барьера, м	Удобрения, т	Вынос азота растениями, т	Потери азота, т	Поступление азота из грунтовых вод, т	Перехват азота барьером, %
400	120	116	26	22	53
600	180	175	34	28	69
800	240	233	41	34	82
1200	360	348	53	41	99

Примечание. Перехват азота на полях орошения сточными водами составил около 90%.

Освоение земель со сложным рельефом и комплексным почвенным покровом рассмотрено на территории Палассовской оросительно-обводнительной системы (ПООС), которая расположена в острозасушливом Северном Прикаспии на древних морских соленосных отложениях. Мезорельеф здесь представлен падинами глубиной 0,5...1,5 м, площадью 1...100 га и лиманами глубиной до 2 м, площадью в несколько км². Микрорельеф имеет вид западин глубиной 0,2...0,5 м с незасоленными темноцветными или лугово-каштановыми почвами и прилегающих к ним склонов со светло-каштановыми солонцеватыми почвами, и фоновых микроповышений с солончаковыми солонцами.

Территория ПООС очень слабо дренирована. На ней к 1970 г. была построе-

на оросительная система без достаточного учета рельефных, почвенных и гидрогеологических условий, не будучи оборудованной дренажем. Необлицованные каналы приводили к большим потерям воды, быстро (за 3...4 года) подъему грунтовых вод с 7 до 1...3 м, и как следствие, к сильному сокращению оросительных норм с 6000...8000 до 1000...2000 м³/га (появилась субиригация). Быстрыми темпами земли стали засоляться.

Используя математическую модель формирования водно-солевого режима при орошении [7], мы ретроспективно оценили процесс засоления орошаемых земель со сложным рельефом и плохой дренированностью. Динамика оросительных норм удовлетворительно совпала с фактической (рис. 2).



Рис. 2. Ретроспективное моделирование ситуации при орошении земель ПООС

Институтом леса АН РФ предложено рассматриваемую территорию представлять в виде вложенных друг в друга доминантных (возвышенные пространства со своим микрорельефом) и субдоминантных урочищ с западинами, содержащими, в свою очередь, возвышенные, склоновые и пониженные фации (рис. 3) [8].



Рис. 3. Ландшафтное представление земель Северного Прикаспия

На основе этого мы применили известную схему «сухого» дренажа, когда сравнительно небольшие орошаемые участки окружены бездренажной территорией, которая принимает отток грунтовых вод и расходует их на испарение, т.е. схему оазисного орошения. Для этого С.Ф. Аверьяновым разработана несложная теория радиально-осевой фильтрации, а для совместного движения влаги при полном и неполном насыщении и растворенных в ней солей с учетом сложного рельефа нами разработана и использована соответствующая двумерная математическая модель [7] и выполнена серия расчетов при разном сочетании орошаемых площадей и недренированных территорий (табл. 2).

Таблица 2

Результаты моделирования оазисного орошения при разной доле орошаемых земель

Площадь падины, га, %	Боковой отток, мм	Промываемость, мм	Испарение, мм	Оросительная норма, мм	Глубина грунтовых вод, м	Запасы солей, кг/га в слое		Сумма солей в 1 м слое, %	
						14 м	5 м	в падине	на склоне
38 (12%)	18	88	612	311	3,4	77	5	0,04	0,48
79 (25%)	13	75	615	300	3,1	97	10	0,04	0,66
154 (49%)	6	66	618	290	2,8	128	23	0,09	0,87
227 (72%)	3	62	621	275	2,6	146	35	0,14	0,92

Примечание. Площадь падины выражена как часть общей площади.

Как показали расчеты, орошаемые падины могут обеспечить местное население овощами, а животноводство, имеющее отгонный характер, — страховыми запасами кормов на период суровых зим. На-

добности в сплошном орошении подобных пятнисто засоленных земель со сложным мезо- и микрорельефом, почти не обеспеченных естественным дренажем, мы не видим по причине виду его малой эффективности

и экологической опасности, что доказано 30-летним опытом. Обводнительная часть системы необходима для водоснабжения населенных пунктов этого безводного региона. При оазисном орошении в основном эксплуатируется испарительный барьер.

Предлагается понятие галоёмкости (солеёмкости) ландшафта как установившиеся равновесные запасы солей, сформировавшиеся при длительных стационарных или квазистационарных внешних факторах: погодных, гидрогеологических, почвенных, организационно-хозяйственных [9]. Этот термин был предложен нами в 2008 г. с целью обоснования мероприятий по рассолению почв.

Засоленность может направленно изменяться в многолетнем разрезе, но при стабильных внешних воздействиях, даже циклично изменяющихся, она достигает определенного, стабильного в многолетнем разрезе уровня, что мы и предлагаем называть галогеохимической ёмкостью или кратко – солеёмкостью. Это положение, например, подтверждается результатами длительного прогноза засоления и рассоления

почв Колочной степи в Барабинской низменности (Западная Сибирь) в случае изменения положения базиса эрозии.

Моделировалось изменение базиса эрозии (повышение уровня в естественных дренах с 3-х до 1,5 м и последующее их опускание) при регулярном притоке подземных вод с предгорий Алтая, имеющих минерализацию около 5 г/л. В начале моделирования длительного предшествовавшего периода, равного 150 лет, установились стабилизовавшиеся при глубине базиса эрозии 3 м солезапасы в 6 метровом слое, равные 200 т/га. После повышения базиса эрозии и уменьшения глубин грунтовых вод сформировалась новая солеёмкость, которая стала заполняться, солезапасы стали увеличиваться, но с переменной скоростью, и через 90...100 лет практически стабилизовались на уровне около 600 т/га. В дальнейшем при снятии подпора в естественных дренах были созданы условия для формирования исходной солеёмкости (до подпора), вследствие чего солезапасы стали уменьшаться, правда, с меньшей скоростью, и восстановились на исходном уровне через 120...140 лет (рис. 4).

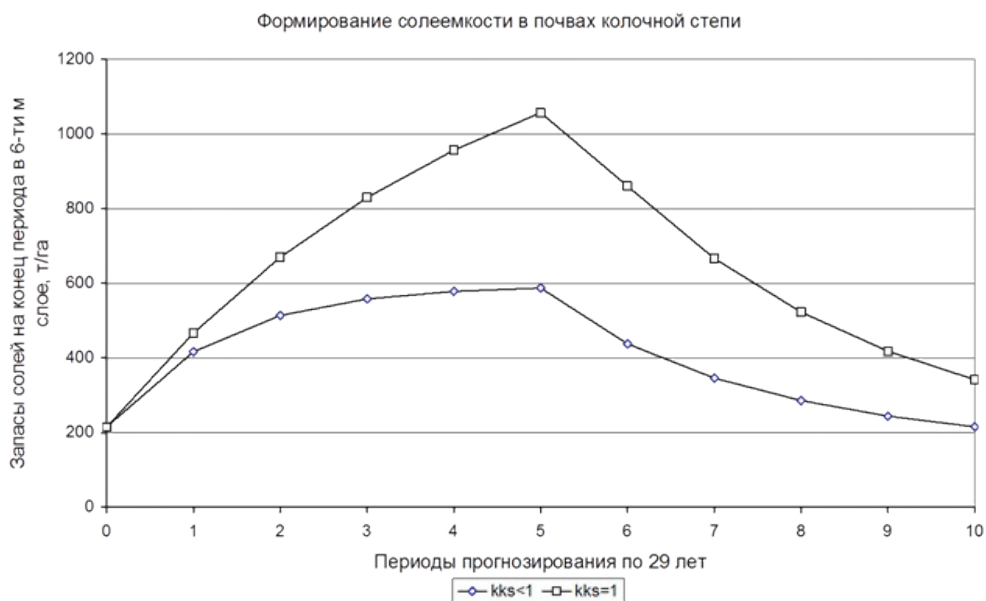


Рис. 4. Формирование солеёмкости в почвах Колочной степи Западной Сибири

Следует отметить необходимость определенной полноты подобных моделей, которые должны содержать реально существующие механизмы сдерживания природных процессов или иметь обратные связи, объясняющие их затухание. В данном случае уменьшение скорости соленакпления было объяснено фактором снижения транспи-

рации влаги растительным покровом при засолении почвы и при его угнетении. Это обеспечивалось введением в расчеты коэффициента засоления $kks < 1$. Без его учета получался неограниченный рост солезапасов (рис. 4, верхняя кривая).

Таким образом, понятие «солеёмкость» создает методологическую основу для ме-

лиорации засоленных почв, которая должна сводиться к управлению солеёмкостью, а не к разовому удалению солей, например, при капитальных промывках без устранения причин их вызывающих.

Для теоретической оценки солеёмкости можно воспользоваться разработками С.Ф. Аверьянова, опубликованными в 1965 г. [10]. В этой работе он предложил способы оценки установившихся среднепогодных запасов солей в аридной зоне при неглубоких минерализованных грунтовых водах.

Выводы

Создание, разрушение, управление биогеохимическими барьерами раскрывают сущность мелиорации и рекультивации земель, дополняют их приемы, для их применения требуются адекватные математические модели и способы долготермического прогнозирования природных и антропогенных процессов.

Библиографический список

1. Голованов А.И. Мелиорация ландшафтов // Мелиорация и водное хозяйство. – 1993. – № 3. – С. 6–8.
2. Ландшафтоведение: Учебник / Под ред. А.И. Голованова. – М.: «КолосС», 2005. – 216 с.
3. Ландшафтоведение: Учебник / Под ред. А.И. Голованова. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Изд. «Лань», 2015. – 224 с.
4. Природообустройство: Учебник / Под ред. А.И. Голованова. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Изд. «Лань», 2015. – 560 с.: ил.
5. Перельман А.И. Геохимия ландшафта // Учебное пособие для географических и геологических специальностей университетов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1975. – 341 с.

A.I. GOLOVANOV, S.A. MAKSIMOV

Federal state budget educational institution of higher education «Russian state agrarian university – MAA named after S.A. Timiryazev», Moscow

APPLICATION OF THE THEORY OF BIOGEOCHEMICAL BARRIERS UNDER LAND RECLAMATION AND RECULTIVATION²

It is proposed to use a theory of biochemical barriers to substantiate methods of land reclamation and recultivation. As an example, land irrigation by waste water of cattle breeding complexes is considered when creating a biochemical barrier to the flow of nitrates in the way of grasses sowing lower along the flow direction, width approximately equal to the irrigated area which is recommended for elimination of ground and river water pollution. For land

6. Экологически безопасная технология утилизации животноводческих стоков: Учебно-методическое пособие / А.И. Голованов, В.А. Евграфов – М.: Изд. МГУП, 2004. – 60 с.

7. Голованов А.И., Сотнева Н.И. Математическое моделирование влаго- и солелепоронос в геосистемах солонцовых комплексов Северного Прикаспия // Почвоведение. – 2009. – № 3. – С. 273–289.

8. Доскач А.Г. Природное районирование Прикаспийской полупустыни. – М.: Наука, 1979. – 144 с.

9. Голованов А.И. Управление галоёмкостью ландшафтов // Природообустройство. – 2008. – № 2. – С. 19–25.

10. Аверьянов С.Ф. Некоторые вопросы предупреждения засоления орошаемых земель и меры борьбы с ним в Европейской части СССР // В сб.: Орошаемое земледелие в Европейской части СССР. – М.: «Колос», 1965.

Материал поступил в редакцию 15.07. 2016.

Сведения об авторах

Голованов Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник Института природообустройства имени А.Н. Костякова ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550. г. Москва, ул. Прянишникова д.19; e-mail a.i.golovanov@mail.ru, тел. 8-916-341-35-51.

Максимов Сергей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Мелиорация и рекультивация земель»; ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550. г. Москва, ул. Большая Академическая, д. 44; e-mail: s.a.maksimov@mail.ru; тел. 8-985-239-68-9.

² The material was presented in a form of the report 01.06.2016 at the plenary meeting of the conference «50 years of the Program of wide development of land reclamation».

development with a complex soil covering «dry» drainage» is recommended on the area equal to the bottom of a subdominant hole. The 30 years practical experience of land reclamation of the Palassovskoj irrigation-watering system showed that the entire irrigation of large areas appeared impossible when there was no natural drainage. We do not see the necessity in the entire irrigation of similar spotty salted lands – with a complex mezzo- and micro relief, almost unprovided with natural drainage due to the reason of its small efficiency and ecological danger. For substantiation of the measures of the preventing secondary land salinization it is feasible to use a conception of halo geochemical capacity or salts capacity, that is equilibrium salts supplies formed under long-term stationary or quasi-stationary external factors: weather, hydrological, soil, organizational-economic. There is simulated a long-term dynamics of the land salts capacity of the Kolochnij steppe of the Western Siberia formed by a flow of ground water from the Altai foothills. The conception salt capacity creates a methodological basis for reclamation of saline soils which should be turned out to the control of this salts capacity but not to occasional salts removal, for example, under major washing without tackling the causes. Creation, destruction, control of biogeochemical barriers reveals the essence of land reclamation and recultivation, replenishes their methods. For their usage there are required adequate mathematical models and ways of long-term forecasting of natural and anthropogenic processes.

Biochemical barriers, nitrogen interception, dominant and subdominant holes, «dry» drainage, halo geochemical capacity of landscape (salts capacity).

Reference

1. **Golovanov A.I.** Melioratsiya landshaftov // Melioratsiya I vodnoye hozyajstvo. – 1993. – № 3. – S.6–8.

2. Landshaftovedenie: Uchebnik / Pod red. A.I. Golovanova. – M.: «KolosS», 2005. – 216 s.

3. Landshaftovedenie: Uchebnik / Pod red. A.I. Golovanova. – 2-e izd., ispr. i dop. – SPb.: Izd. «Lanj», 2015. – 224 s.

4. Prirodoobustroistvo: Uchebnik / Pod red. A.I. Golovanova. – 2-e izd., ispr. i dop. – SPb.: Izd. «Lanj», 2015. – 560 s.

5. **Pereljman A.I.** Geohimiya landshafta // Uchebnoye posobie dlya geographicheskikh I geologicheskikh spetsialnostej universitetov. 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Vysshaya shkola, 1975. – 341s.

6. Ecologicheskaya bezopasnaya tehnologiya utilizatsii zhivotnovodcheskih stokov: Uchebno-metodicheskoye posobie / A.I. Golovanov, B.A. Evgrafov – M.: Izd. MGUP, 2004. – 60 s.

7. **Golovanov A.I., Sotneva N.I.** Matematicheskoye modelirovanie vlago-isoleperenosav geosistemah solontsovykh complexov Severnogo Prikaspiya // Pochvovedenie. – 2009. – № 3. – S. 273–289.

8. **Doskach A.G.** Prorodnoyeraionirovanie Pricaspijskoj polypustyni. – M.: Nauka, 1979. – 144 s.

9. **Golovanov A.I.** Upravlenie galoemkostiyu landshaftov // Prirodoobustroistvo S – 2008. – № 2. – С. 19–25.

10. **Averianov S.F.** Nekotorye voprosy preduprezhdeniya zasoleniya oroshaemykh zemelj i mery borjby s nim v Evropejskoj chasti SSSR // V sb.: Orosshaemoye zemledelie v Evropejskoj chasti SSSR.– M.: «Koloss», 1965.

The material was received at the editorial office
15.07. 2016.

Information about the authors

Golovanov Alexander Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, honored scientist of RF, chief researcher of the Institute of environmental engineering named after A.N. Kostyakov FSBEI HE RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, d. 19; e-mail a.i.golovanov@mail.ru, tel. 8-916-341-35-51.

Maksimov Sergey Alexeevich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair «Lands reclamation and recultivation»; FSBEI HE RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Boljshaya Akademicheskaya, d. 44; e-mail s.a.maksimov@mail.ru; tel. 8-985-239-68-9.