

УДК 502/504:551.311.2:551.33

О. Я. МАСЛИКОВА

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт водных проблем Российской академии наук, г. Москва**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ
СНЕГОТАЯНИЯ НА ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ***

В гидравлической лаборатории Российского университета дружбы народов выполнены измерения количества тающего снега в реальном времени, исследован процесс непрерывного снеготаяния с последующей инфильтрацией талых вод в грунт. Рассмотрено воздействие инфракрасного (ИК) и ультрафиолетового (УФ) излучения на снежный покров. Получены зависимости изменения альбедо снега в процессе таяния. Работа является продолжением исследования динамики берегового склона водных объектов в условиях криолитозоны. Интенсивность воздействия на снег ИК и ИФ излучения ослабевает с глубиной по закону Бугера-Ламберта. Облачность является задерживающим фактором только для ИК участка спектра. Поэтому в дневные часы воздействие ультрафиолета на снеготаяние происходит при любой погоде (кроме дождливой), тогда как инфракрасное излучение действует непосредственно лишь в ясные дни. Под воздействием ИК излучения альбедо снежного покрова изменяется и достигает нулевого значения быстрее, хотя начальное значение альбедо свежевыпавшего снега близко к 1, что означает практически полное отражение в начале таяния. УФ-волны практически сразу проникают вглубь снега, чем и объясняется меньшее отражение с поверхности, но альбедо под воздействием УФ-лучей уменьшается с меньшим коэффициентом.

Криолитозона, оттаивание грунтов, снеготаяние, солнечная радиация, альбедо снега.

Введение. Природная среда в средних и высоких широтах Северного полушария наиболее чувствительна к наблюдающимся глобальным изменениям климата. Весеннее изменение температуры, а вместе с ней и превращение снега в воду играют роль даже большую, чем влияние дождевых потоков. Это выражается в том, что процесс таяния в некоторых случаях происходит в течение нескольких суток, и все твердые осадки, накопившиеся за зимний период (их толщина может достигать нескольких метров), превращаются в потоки воды, провоцируя интенсивные береговые процессы. Быстрое таяние снега в период резкого потепления вкупе с дождевыми осадками также может являться причиной весенних паводков.

При радиационном снеготаянии под действием проникающих в снежную толщу солнечных лучей снег тает не только на поверхности, но и в верхнем слое толщиной 20...40 см. Это характерно для континентальных территорий Сибири, Заволжья. В [2] отмечается, что снег тает уже в первые дни весны, когда температура воздуха еще ниже нуля, а солнечная

радиация уже оказывает ощутимое воздействие. Таяние начинается не сверху, а в глубине снежного покрова под поверхностной прозрачной ледяной пленкой. Это явление называют «парниковым эффектом». Снег совершенно непрозрачен для лучей длинных волн красной части спектра. Он их почти полностью отражает. Зато коротковолновые лучи проходят сквозь тонкий поверхностный слой снега свободно. Этот слой становится своеобразным «ледяным стеклом», не пропускающим собственное длинноволновое излучение глубинных слоев и защищающим их тем самым от охлаждения. В Сибири этот механизм часто обеспечивает таяние и сток основной массы снега при отрицательных температурах воздуха.

В районах России с морским климатом, например в западных областях Карелии, преобладает второй тип снеготаяния – конвективный (или адвективный, по определениям различных авторов): снеготаяние только за счет обмена теплом с воздухом.

Конвективное снеготаяние происходит при пасмурной погоде за счет притока теплых воздушных масс. Этот процесс часто усиливается выпадением жидких осадков и может продолжаться круглые

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-05-00342).

сутки. Таяние снега происходит в две стадии: днем талая вода скапливается в крупных порах и движется вниз, оплавления кристаллы снега; ночью же замерзает. Это явление повторяется много раз и приводит к перекристаллизации снега.

Таяние снега. Таяние снега [3] происходит, когда температура его поверхности становится равной 0 °С. Скорость таяния M выражается в кг/(м²с), или мм/с для водно-эквивалентной толщины слоя и определяется как:

$$M = E_{\text{melt}}/L_i, \quad (1)$$

где $L_i = 334$ Дж/кг – удельная теплота таяния (замерзания); E_{melt} – затраты тепла на таяние, то есть количество тепла, поступившее на поверхность снега, когда его температура уже поднялась до 0 °С.

Наиболее часто задача расчета снеготаяния решается на основе использования уравнения теплового баланса:

$$E_{\text{melt}} = I_s + I_{\text{иа}} + I_{\text{ив}} - I_{\text{т}} - I_{\text{ик}}, \quad (2)$$

E_{melt} – итоговый приход тепла к снегу в ккал/см²; I_s – суммарная радиация; $I_{\text{иа}}, I_{\text{ив}}$ – излучение атмосферы и воды; $I_{\text{т}}$ – турбулентный теплообмен с атмосферой; $I_{\text{ик}}$ – теплообмен с атмосферой при испарении и конденсации.

Известно [4], что коротковолновая часть радиации может проникать в снежную толщу на несколько десятков сантиметров. Известно также, что закон, по которому интенсивность радиации ослабевает с глубиной, имеет вид (закон Бугера-Ламберта):

$$I(z) = I_0 e^{-\beta z}, \quad (3)$$

где $I(z)$ – интенсивность радиации на глубине z м от поверхности снега; β – коэффициент *экстинкции* (ослабления), м⁻¹.

Различные авторы предлагают использовать различные значения коэффициента экстинкции β и его зависимости от плотности снега, от размера кристаллов льда в снеге, от его влажности, от участка спектра падающей радиации и др. Так, например, существует большая разница в значении β для коротковолнового и длинноволнового участков спектра. В [5] предложено значение $\beta = 10$ м⁻¹ для коротких волн и 250 м⁻¹ для длинных.

Зная о свойстве УФ-радиации проникать вглубь непрозрачных веществ (например, облаков), можно предположить, что облачность является задерживающим фактором только для ИК участка спектра. Поэтому в дневные часы воздействие ультрафиолета на снеготаяние происходит при любой погоде (кроме дождливой), тогда как инфракрасное излучение действует непосредственно лишь в ясные

дни.

Из [6], [7] известны распределения мощности солнечного излучения на территории Земли, территории России, продолжительность солнечного излучения на той или иной территории. В средних широтах в дневное время значение потока солнечного излучения достигает 800 Вт/м², снижаясь до 250...300 Вт/м² зимой. Видимый свет занимает узкий интервал длин волн, всего 0,40...0,76 мкм. Однако в этом интервале заключается 47 % всей солнечной лучистой энергии, то есть почти половина. На инфракрасное излучение приходится 44 %, а на ультрафиолетовое – 9 % всей лучистой энергии.

Наибольшую интенсивность поток энергии имеет в мае, июне и июле. В этот период в средней полосе России на 1 м² поверхности приходится 5 кВт.час в день. Наименьшая интенсивность в декабре-январе, когда 1 кв. метр поверхности приходится 0,7 кВт.час в день. При безоблачном небе суммарная радиация имеет суточный ход с максимумом около полудня и годовой ход с максимумом летом.

Если интенсивность падающей на поверхность снега радиации задана, то различия во времени поглощенной снегом энергии будут результатом различий в значениях *альбедо* снега.

$$I = I_0 - I_0 A = I_0 (1 - A), \quad (4)$$

где I_0 – интенсивность падающей радиации; A – коэффициент отражения (альбедо).

Изменение коэффициента отражения снега в период снеготаяния объясняется изменением физических свойств снега [4]. Коэффициент отражения свежеснегавпавшего снега изменяется медленно в зимнее время и очень быстро в период снеготаяния.

Наибольшим альбедо обладает свежеснегавпавший снег (0,90...0,97), сухой снег имеет альбедо 0,75...0,85, старый тающий – 0,40...0,60, влажный загрязненный – около 0,20.

В тех работах, которые учитывают изменение альбедо снега, чаще всего эти изменения связывают с температурой поверхности снега или с его возрастом. В [5] дан обзор моделей, которые учитывают изменение альбедо в зависимости от диаметра снежных зерен и зенитного угла Солнца, а также зависимость коэффициента поглощения от диаметра зерен и плотности снега. В [8] приведены данные измерений интенсивности отраженной радиации над площадками с за-

грязненным в различной степени снегом и получена зависимость альbedo от поверхностной концентрации примеси. Эта зависимость также может быть использована для расчетов снеготаяния.

В работе [7] на основе данных наблюдений со спутников Nimbus, опубликованных в атласах NASA, были построены графики широтных распределений величин альbedo для наиболее характерных месяцев и графики вариаций альbedo по месяцам.

Таким образом, при расчете процесса снеготаяния в конкретной географической области мы можем получить из разных источников все необходимые данные (интенсивность солнечной радиации в рассматриваемых нами районах, альbedo в данных районах и его временной изменчивости, а также прогноз облачности и карты распределения температур над нужным регионом) для решения системы уравнений (1) – (4), полностью описывающей процесс снеготаяния. В лабораторных условиях была проведена верификация данной модели, сравнение рассчитанных и наблюдаемых результатов и исследование изменения альbedo от длины падающей волны.

Экспериментальные исследования на лабораторной модели. Исследование влияния конвективной составляющей на процесс снеготаяния проводились в

гидравлической лаборатории РУДН на установке, позволяющей моделировать дождевые потоки различной интенсивности, одновременно измеряя как скорость и количество инфильтрационных потоков, так и количество бокового стока. Результаты этих экспериментов приведены в [9] и [10].

Также проводились исследования влияния радиационной составляющей на процесс снеготаяния. Для этого в гидравлической лаборатории РУДН были поставлены эксперименты с воздействием инфракрасного (ИК) и ультрафиолетового (УФ) излучения на снежный покров. В процессе эксперимента измерялись количества таящего снега в реальном времени. Талые потоки просачивались через подстилающий грунт (в нашем случае – люберецкий песок), предварительно охлажденный до $0...2^{\circ}\text{C}$. Измерения проводились при примерно одинаковой мощности ламп (100 Вт), что дало возможность выявить разницу воздействия разной длины излучений на снеготаяние при прочих равных условиях (температура окружающей среды, плотность и структура снега, толщина снежного покрова). Также при этих же условиях проводился эксперимент со свободным (без воздействия излучения) таянием. Для всех трех случаев были построены графики зависимости количества талых потоков от времени (рис. 1).

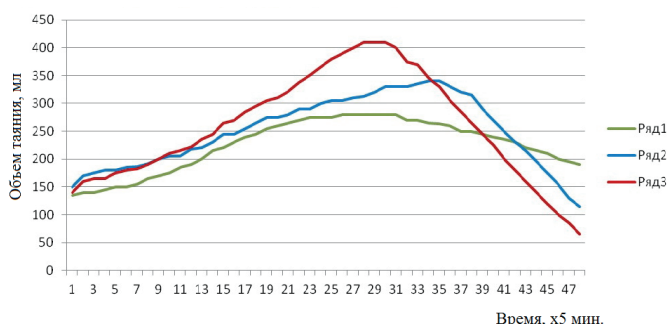
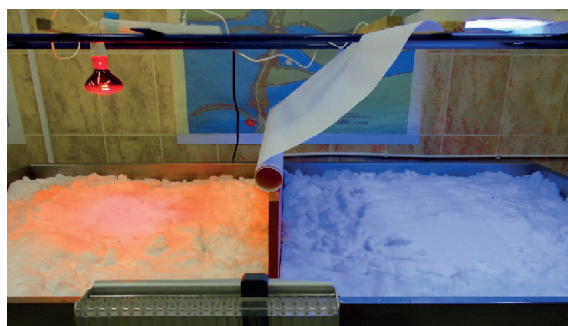


Рис. 1. Эксперимент с одинаковой мощностью длинноволнового и коротковолнового участков спектра: Ряд 1 – свободное таяние; Ряд 2 – УФ; Ряд 3 – ИК; мощности ламп в обоих случаях одинаковы (100 Вт)

Так как во всех трех случаях присутствует одинаковая конвективная составляющая снеготаяния (эксперименты проводились при определенных начальных условиях), были получены графики зависимости снеготаяния исключительно от воздействия УФ и ИК-радиации путем вычитания из полученных экспериментально зависимо-

стей графика свободного (конвективного) таяния (рис. 2 – участок возрастания объема таяния). Из рисунка 2 видно, что объем таяния возрастает от времени при постоянном внешнем воздействии ламп. Это объясняется изменяющейся структурой снега и, как следствие, изменением его влагоудерживающей способности.

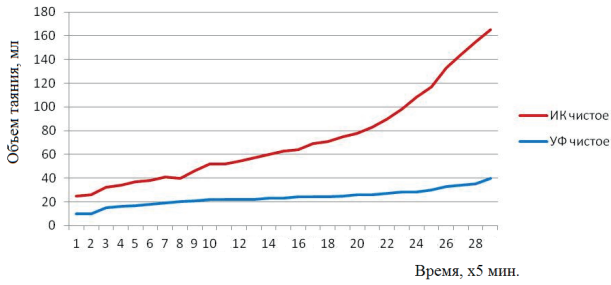


Рис. 2. Объемы снеготаяния под влиянием УФ (синяя линия) и ИК (красная линия) участков спектра (без воздействия тепловой составляющей)

В системе уравнений (1) – (4) для лабораторных условий пренебрегли излучением атмосферы и воды, затратами тепла на испарение и конденсацию и учитывали исключение в полученных графиках конвективной составляющей, получили:

$$M = \frac{I_0 e^{-\beta z}}{L_i} (1 - A), \quad (5)$$

где β – коэффициент экстинкции; A – альbedo снежного покрова.

Таяние происходит во всей снежной толще. Талые потоки, рассчитанные по закону Бугера-Ламберта на всех слоях, суммируются с приходящими с верхних горизонтов. В итоге подстилающей поверхности достигает сумма этих потоков, вычисляемая суммированием формулы (5) по координате z (от $-z$ до 0). После интегрирования данного выражения по толщине снежного покрова, получено:

$$M = \int_{-z}^0 \frac{I_0 e^{-\beta z}}{L_i} (1 - A) dz = \frac{I_0 (1 - A)}{L_i \beta} (1 - e^{-\beta z}), \quad (6)$$

Формула (6) описывает характер снеготаяния по времени в зависимости от интенсивности падающей солнечной радиации, толщины изначального снежного покрова и коэффициента экстинкции. Все параметры – постоянные величины, кроме изменяющегося во времени альbedo. Из формулы видно, что при отсутствии снежного покрова (толщина $z=0$) никакого таяния происходить не будет.

Исследование изменения альbedo снежного покрова по данным экспериментов. Из уравнения (6) можно получить график зависимости альbedo от времени при воздействии лучей разной природы:

$$A(t) = 1 - \frac{ML_i \beta}{I_0 (1 - e^{-\beta z})}. \quad (7)$$

Для объема таяния преобразовали полученный экспериментальный график (рис. 2) до вида (мл/сек) и проинтерполируем его. В результате линия тренда под воздействием ИК-лучей приобрела вид $V_{\text{эксп}} = 21,6e^{0,00016t}$, $\beta = 250 \text{ м}^{-1}$; под воздействием УФ-лучей $V_{\text{эксп}} = 11,8e^{0,00008t}$, $\beta = 10 \text{ м}^{-1}$. Подставляя эти зависимости в (7) и учитывая, что скорость таяния M есть производная объема таяния $V_{\text{эксп}}$ по времени, можно построить графики изменения альbedo от времени в процессе таяния снега (рис. 3).

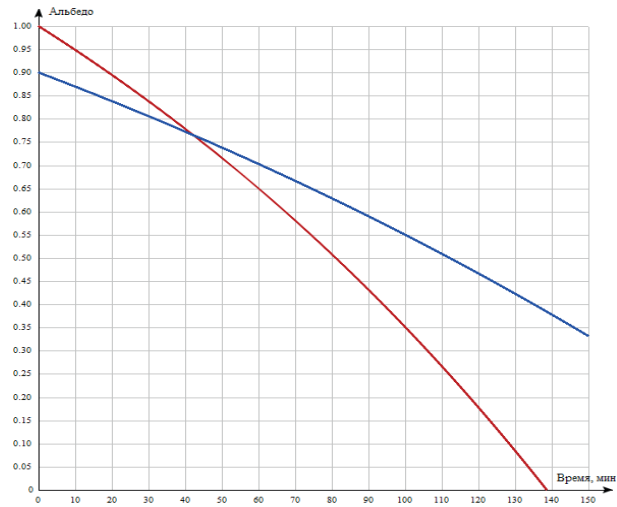


Рис. 3. Графики изменения альbedo в процессе таяния снега для ИК (красная линия) и УФ (синяя линия) излучений

Из рисунка 3 видно, что под воздействием ИК-лучей альbedo изменяется и достигает нулевого значения быстрее, хотя начальное значение близко к 1, что означает полное отражение в начале таяния. УФ-волны практически сразу проникают вглубь снега, чем и объясняется меньшее отражение с поверхности, но альbedo под воздействием УФ-лучей уменьшается с меньшим коэффициентом. Период максимума таяния для случая с ИК-лампами наступает быстрее. Зависимость альbedo от времени в процессе таяния носит экспоненциальный характер, что хорошо согласуется с данными, приведенными в [8].

Выводы

Интенсивность воздействия на снег ИК и ИФ излучения ослабевает с глубиной по закону Бугера-Ламберта: $I(z) = I_0 e^{-\beta z}$, где $I(z)$ – интенсивность радиации на глубине z м от поверхности снега; β – коэффициент экстинкции (ослабления, м^{-1}).

Существует большая разница в значении β для коротковолнового и длинноволнового участков спектра. Вся длинноволновая радиация поглощается верхним слоем снега, и ИК-участок спектра несет энергию, преобразующуюся в тепловую уже на поверхности снега.

Поскольку короткие волны (УФ) проникают вглубь непрозрачных веществ и преобразуются в тепловые потоки внутри снежной толщ, влияние этих лучей на снеготаяние носит отличный от влияния ИК-лучей характер. Облачность является задерживающим фактором только для ИК-участка спектра. Поэтому в дневные часы воздействие ультрафиолета на снеготаяние происходит при любой погоде (кроме дождливой), тогда как инфракрасное излучение действует непосредственно лишь в ясные дни.

Под воздействием ИК-излучения альbedo снежного покрова изменяется и достигает нулевого значения быстрее, хотя начальное значение альbedo свежевыпавшего снега близко к 1, что означает практически полное отражение в начале таяния. УФ-волны практически сразу проникают вглубь снега, чем и объясняется меньшее отражение с поверхности, но альbedo под воздействием УФ-лучей уменьшается с меньшим коэффициентом.

Полученные результаты исследования одной из составляющих единого термогидродинамического процесса (радиационное снеготаяние) являются необходимой частью общего прогноза влияния изменения климата на течение деструктивных криогенных процессов в зоне ММП.

Библиографический список

1. Влияние осадков в виде дождя на деформации берегового склона русел рек в условиях многолетнемерзлых пород / Грицук И. И., Дебольский В. К., Масликова О. Я., Пономарев Н. К. // Лед и снег. – 2012. – № 3(119). – С. 73–78
2. Дюнин А. К. В царстве снега. Серия: Человек и окружающая среда. –

Новосибирск.: Наука, 1983. – 160 с.

3. Шмакин А. Б., Турков Д. В., Михайлов А. Ю. Модель снежного покрова с учетом слоистой структуры и ее сезонной эволюции // Криосфера Земли. – 2009. – Т. XIII. – № 4. – С. 69–79.

4. Кузьмин П. П. Физические свойства снежного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1957. – 180 с.

5. Мачульская Е. Е. Моделирование и диагноз процессов тепловлагообмена между атмосферой и сушей в условиях холодного климата: дис. ... канд. ф.-м. наук. – М.: МГУ, 2001 г.

6. Кривцов В. А. Физическая география России: Общий обзор. – Рязань.: Изд-во «R&TL ltd», 2001. – 168 с.

7. Альbedo, поглощенная солнечная радиация и уходящая длинноволновая радиация / Скляр Ю. А. [и др.] // Известия Саратовского университета. – 2009. – Т. 9. – Сер. Науки о Земле. – Вып. 1. – С. 44–55.

8. Калужный И. Л., Шутов В. А. Современное состояние проблемы натуральных исследований снежного покрова // Водные ресурсы. – 1998. – Том 25. – № 1. – С. 34–42

9. Лабораторное исследование снеготаяния как составляющей сезонного процесса деформаций русла / Грицук И. И., Дебольский В. К., Масликова О. Я. [и др.] // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2013. – № 3. – С. 83–91.

10. Масликова О. Я., Козлов Д. В. Влияние зимних и весенних условий на размыв рек в криолитозоне // Природообустройство. – 2014. – № 1. – С. 54–59.

Материал поступил в редакцию 05.05.2015.

Сведения об авторе

Масликова Оксана Яковлевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник; Институт водных проблем РАН; 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3; тел.: 8(499)135-72-01; e-mail: oksana68@mail.ru.

O. YA. MASLIKOVA

The Federal state budget educational institution of science
The Institute of water problems of the Russian academy of sciences, Moscow

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE INTENSITY OF SNOW MELTING ON THE LABORATORIAN MODEL

In the hydraulic laboratory of the Russian university of peoples' friendship measurements were fulfilled of the amount of thawing snow in the real time, the process of the continuous snow melting was investigated with further infiltration of thawed water into the soil. There is considered the influence of infrared (IR) and ultraviolet (UV) radiations on the snow cover. There are obtained dependencies of the change of snow albedo in the process of melting. The work is the continuation of investigation of the dynamics of the coastal slope of water bodies under the conditions of cryolite area. The intensity of the influence of the IR and UV radiation on snow weakens with the depth according to the Bouguer–Lambert law. Cloudiness is a retarding factor only for the IR part of the spectrum. Therefore in the daytime the influence of ultraviolet on snow melting occurs in any weather (except rainy), whereas the infrared radiation effects only on clear days. Under the influence of the IR radiation albedo of the snow cover changes and achieves the zero value faster though the initial value of the fresh snow is close by 1 which means practically a full reflection at the beginning of melting. UV waves practically immediately penetrate deep into snow, which explains less reflection from the surface, but albedo under the influence of UV rays decreases with a minor coefficient.

Cryolite area, soil thawing, snow melting, solar radiation, snow albedo.

References

1. The influence of precipitation in the form of rain on deformations of coastal slope of river channels under the conditions of permafrost rocks / Gritsuk I.I., Deboljsky V.K., Maslikova O.Ya., Ponomarev N.K. // Ice and snow. – 2012. – № 3(119). – P. 73–78
2. Dyunin A. K. In the kingdom of snow. Series: Man and environment. – Novosibirsk.: Nauka, 1983. – 160 p.
3. Shmakin A. B., Turkov D. V., Makhailov A. Yu. Model of snow cover taking into consideration the lamellar structure and its seasonal evolution // Cryosphere of Earth. – 2009. – V. XIII. – № 4. – P. 69–79.
4. Kuzjmin P. P. Physical properties of the snow cover. – L.: Hydrometeoizdat, 1957. – 180 p.
5. Machuljskaya E. E. Simulation and diagnosis of processes of heat exchange between the atmosphere and land under the conditions of the cold climate: dissertation of the candidate of ph.-mat. sciences. – M.: MSU, 2001.
6. Krivtsov V. A. Physical geography of Russia: General survey. – Ryazan.: Publishing house «R&TL ltd», 2001. – 168 p.
7. Albedo, absorbed solar radiation and outgoing long-wave radiation / Sklyarov Yu.A. [and others] // Izvestiya of the Saratov university. – 2009. – V. 9. – Ser. Sciences about Earth. – Iss. 1. – P. 44–55.
8. Kalyuzhny I. L., Shutov V. A. The modern state of the problem of field researches of snow cover // Water resources. – 1998. – V. 25. – № 1. – P. 34–42.
9. Laboratory researches of snow melting as a component of the seasonal process of channel deformations / Gritsuk I.I., Deboljsky V.K., Maslikova O.Ya. [and others] // Vestnik RUDN. Series: Engineering investigations. – 2013. – № 3. – P. 83–91.
10. Maslikova O. Ya., Kozlov D. V. Influence of winter and spring conditions on rivers washing out in the cryolite area // Environmental engineering. – 2014. – № 1. – P. 54–59.

Received on May 05, 2015.

Information about the authors

Maslikova Oksana Yakovlevna, candidate of technical sciences, senior researcher; The RAS of water problems; 119333, Moscow, ul. Gubkina, 3; tel.: 8(499)135-72-01; e-mail: oksana68@mail.ru.