

УДК 556.5

Моделирование переноса загрязнений потоками в деформируемых руслах в условиях криолитозоны

© 2013 г. Е.И. Дебольская, А.В. Остякова

Институт водных проблем РАН, Москва

e_debolskaya@yahoo.com

Статья принята к печати 12 мая 2013 г.

Водный поток, математическое моделирование, многолетнемёрзлые породы, распространение загрязнений, русловые деформации, таяние льда, термоэрозия.

Channel deformation, ice melting, mathematical modeling, permafrost, pollutant propagation, thermal erosion, water flow.

Представлена трёхмерная математическая модель распространения загрязнений в реках, протекающих в условиях криолитозоны, с учётом возможных деформаций русел, вызванных таянием слагающих их многолетнемёрзлых пород при повышении температуры воды речного потока. Рассматривается также распространение загрязняющих веществ, освобождаемых при размыве береговых склонов, обусловленном термоэрозией. Математическая модель состоит из четырёх блоков: гидродинамического, термического, деформационного и распространения примеси. Сравниваются результаты численного моделирования с данными натурных наблюдений и лабораторных экспериментов. На основе численных экспериментов сделаны выводы о характере распространения загрязнений при нахождении их источника в тающих ледяных пластинах, расположенных в береговом откосе.

Введение

Общая проблема для арктического региона – загрязнение окружающей среды стойкими органическими соединениями и другими веществами, которые годами накапливались на этих территориях. С ростом температуры эти вещества могут попасть из снега, льда, многолетнемёрзлых пород в среду обитания человека. При потеплении климата и деградации мерзлоты возрастает опасность поступления токсичных веществ из мест захоронения химических и радиоактивных отходов. Вынос органического вещества и биогенных элементов, обусловленный таянием многолетнемёрзлых пород, может изменить стратификацию речных и морских вод, нарушить тепловой баланс и сложившееся экологическое равновесие в бассейнах северных рек и прибрежных зонах Северного Ледовитого океана. Так, элементы проекта сооружений для захоронения мусора и загрязняющих веществ рассчитаны на непроницаемую структуру многолетнемёрзлых пород, однако таяние в этих районах может вызвать существенное загрязнение гидрологических ресурсов.

В криолитозоне протекают сибирские реки, бассейны которых представляют собой сложную многопараметрическую систему планетарного масштаба, находящуюся под непрерывным влиянием естественных и антропогенных воздействий. К естественным воздействиям относятся низкая способность биоты как к самовосстановлению, так и к самоочищению,

а также наличие устойчивых геохимических аномалий, создающих под влиянием криогенных процессов ореолы концентрации от залегающих на глубине рудных тел. К антропогенным воздействиям следует отнести разработку месторождений и транспортировку полезных ископаемых, заготовку леса, эксплуатацию речного транспорта, поступление токсичных веществ из мест захоронения химических и радиоактивных отходов. Кроме того, при возрастающей интенсификации освоения месторождений углеводородов на северных территориях возрастает техногенная нагрузка при ненулевом риске техногенных катастроф. Так, трасса нефтепровода Восточная Сибирь – Тихий океан расположена в бассейне р. Лена и пересекает 115 водотоков.

Исследования по изучению влияния потепления на гидрологический режим р. Лена [5] подтвердили, что с середины прошлого века изменился ряд её ключевых параметров. Так, температура воды в Лене в паводковый период повысилась на 2 °С по сравнению с показателями 1950 г., что привело к изменению процессов, влияющих на развитие термальной и механической эрозии берегов. Увеличение темпов термоэрозии с начала 1980-х годов полностью соотносится с ростом температуры водного потока в результате потепления. На некоторых участках скорость отступания берегов достигла 20–40 м в год, а вымываемые породы уносятся по течению и создают проблемы для судоходства.

Выполненные нами лабораторные эксперименты [3, 7] и натурные наблюдения [5, 6] показали, что термоэрозия играет существенную, а в ряде случаев и более значительную роль, чем механическая эрозия, в процессе деформирования русел, сложенных многолетнемёрзлыми породами с включениями пластов льда. Проведение лабораторных и натурных экспериментов для исследования процесса распространения загрязнений при условии деформирования русла, вызванного термоэрозией, — довольно сложная проблема. Прежде всего, это связано с разными временными масштабами исследуемых процессов и сложностью выделения основных факторов, влияющих на них. Математическое моделирование позволяет преодолеть эти трудности. Предлагаемая модель объединяет разработанные ранее трёхмерные математические модели деформаций русла в нижних бьефах ГЭС, расположенных в криолитозоне [2], и термоэрозии береговых склонов рек [1] с моделью распространения примеси.

Постановка задачи

В наклонном береговом откосе на разной глубине расположены две ледяные пластины, равной толщины. Под воздействием водного потока ледяные пластины начинают таять, образуя полости, в которых возникают малые потоки, неоднородные по сечению и длине. Теряющие твёрдую основу в виде льда слои грунта, расположенные между и над ледяными пластинами, начинают оседать под действием силы тяжести. Кроме того, неоднородность потоков в полостях вызывает деформации их стенок, размывая их. Начинают действовать процессы солифлюкции и суффозии. Схема поперечного сечения потока в данной постановке, соответствующая проведению эксперимента в лотке [3], приведена в работе [1]. Основное течение потока направлено вдоль оси x . Длина рассчитываемого участка — 1,5 м, правый берег — вертикальный, левый — наклонный, ширина по урезу воды — 0,5 м, ширина по дну — 0,3 м, глубина — 0,1 м. Толщина каждой из двух пластин льда, помещённых в береговой откос, — 2 см. Расход воды постоянный — $Q = 3,9$ л/с. Температура воды увеличивалась с 7 до 17 °С в течение четырёх часов.

При численном моделировании источник загрязнения с условной концентрацией, равной 100 ед., задавался или в одной из расчётных ячеек основного потока, в этом случае он был постоянно действующим, или в одной из ледяных пластин, тогда он начал действовать по мере прохождения границы фазового перехода через ячейку, в которой был задан. При лабораторном эксперименте осуществлена вторая схема. В ледяные пластины вмораживалось пятно с

красителем, представляющим собой пассивную примесь с плотностью, близкой к плотности воды (рис. 1).

Описание модели

Математическая модель состоит из следующих блоков: 1) теплового — для моделирования таяния ледяных пластин; 2) гидродинамического — для расчёта течения в основном русле и в протаявших полостях; 3) деформационного — для моделирования оседания грунта и переноса наносов в протаявших полостях; 4) блока для расчёта переноса примеси. Первые три блока описаны в работах [1, 2].

В *тепловой блоке* для расчёта перемещения поверхности фазового перехода используется уравнение Стефана. При этом сделаны допущения с соответствующими обоснованиями [1], согласно которым размер пластин уменьшается только в поперечном направлении, а поверхность фазового перехода смещается равномерно по осям x и z . В *гидродинамическом блоке* использовались двумерные уравнения движения жидкости и уравнение неразрывности, получаемые при интегрировании основных трёхмерных уравнений по глубине потока [2]. *Деформационный блок* состоит из одномерного уравнения, параметризующего оседание грунта под действием силы тяжести, и двухмерного уравнения сохранения массы переносимых наносов (уравнения деформаций) [1].

Алгоритм расчётов составлен таким образом, что для открытой части потока и для протаявших полостей (таликов) решаются отдельные системы уравнений как для расчёта скоростей, так и для определения отметок дна — уравнения деформаций. На границах между таликами и основным потоком записывается условие равенства твёрдых расходов. Объединённая модель позволяет варьировать пористость грунта (это — основной параметр степени его замерзания), что было сделано в работе [2]. В настоящем исследовании главное внимание уделено исследованию процесса распространения примеси в условиях русловых деформаций, вызванных термоэрозией. Изменения пористости грунта не рассматривались. В качестве варьируемой характеристики состояния грунта анализировалась его связность, входящая в уравнение, параметризующее оседание грунта под действием силы тяжести.

Блок *переноса примеси* состоит из уравнения переноса примеси:

$$\frac{\partial}{\partial t} c + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} - D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} - D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = 0,$$

где c — концентрация примеси; u, v — продольная (вдоль оси x) и поперечная (вдоль оси y) составляющие

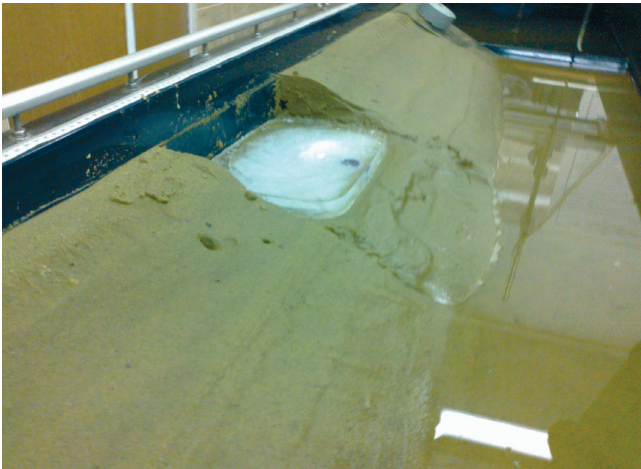


Рис. 1. Закладка ледяной пластины с пятном примеси в береговой откос при проведении лабораторного эксперимента
Fig. 1. The insertion of an ice plate with a spot of the impurity in the coastal slope during a laboratory experiment

скорости потока соответственно; D_x, D_y, D_z – коэффициенты продольного, поперечного и вертикального турбулентного обмена веществом соответственно.

В дальнейшем будем считать их равными соответствующим коэффициентам обмена импульсом, что отвечает условиям распространения пассивной примеси при отсутствии плотностной стратификации. Для их определения использовалось эмпирическое соотношение для связи коэффициента турбулентной диффузии с глубиной $H(x, y, z)$ и средней по глубине горизонтальной скоростью потока $\bar{u}(x, y, t)$ в реках [4]:

$$D_{x,y,z} = \gamma_{x,y,z} H \bar{u},$$

где $\gamma_{x,y,z}$ – эмпирические константы: $\gamma_x = 0,06$, $\gamma_y = 0,024$, $\gamma_z = 0,008$.

Граничные условия на всех твёрдых поверхностях, в том числе и на поверхностях таликов, задавались в виде нулевого потока переносимого вещества.

Верификация модели и результаты расчётов

В результате расчётов получены трёхмерные распределения горизонтальных скоростей и концентраций примеси в открытом потоке и в таликах, а также двумерные распределения отметок дна и твёрдых поверхностей таликов (деформации берегов). Результаты расчётов с использованием гидродинамического, теплового и деформационного блоков приведены в работе [1], продолжение которой – настоящее исследование. Для подтверждения адекватности модели выполнены дополнительные численные и лабораторные эксперименты без привлечения блока переноса примеси. Так, проведено сравнение с данными [7, 8], полученными с помощью математического

и лабораторного моделирования, и результатами натурных наблюдений за эрозией берегов р. Лена и изменениями температуры воды [5, 6]. Анализ этих материалов позволил авторам [5, 6] установить прямую зависимость увеличения объёма деформаций, вызванных термоэрозией, от роста температуры воды в период половодья. Моделирование такой зависимости авторами работы [8] показало, что скорость эрозии может увеличиваться в среднем на 20% при росте температуры воды на 2 °С. В настоящей работе использована одномерная модель, основанная на интегральном методе расчёта теплового баланса. Эта гипотеза проверена с помощью нашей модели. На рис. 2 приведены изменения положения берегового откоса (зависимость ширины русла от вертикальной отметки) через 30 мин после начала численного эксперимента при начальной температуре воды 7 и 9 °С. Увеличение температуры воды на 2 °С привело к росту объёма деформаций в среднем на 25%.

В работе [7] на основе математического моделирования с использованием одномерного уравнения теплопроводности и эмпирических зависимостей для коэффициента переноса от параметров водного потока получено соотношение для оценки термического погранслоя и скорости эрозии при обтекании дна. Эти соотношения проверены данными лабора-

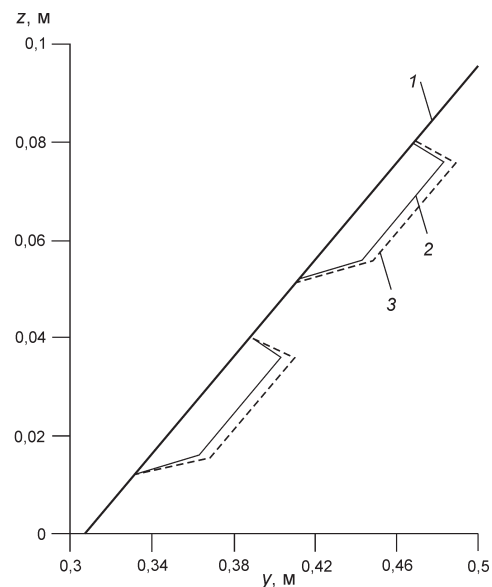


Рис. 2. Изменения положения берегового откоса (зависимость ширины русла от вертикальной отметки) в начале эксперимента (1) и через 30 мин после начала численного эксперимента при начальной температуре воды 7 °С (2) и 9 °С (3)

Fig. 2. Change of the coastal slope (the width of the channel from the vertical coordinate) at the beginning of the experiment (1) and 30 minutes after the start of the numerical experiment with an initial water temperature of 7 °С (2) and 9 °С (3)

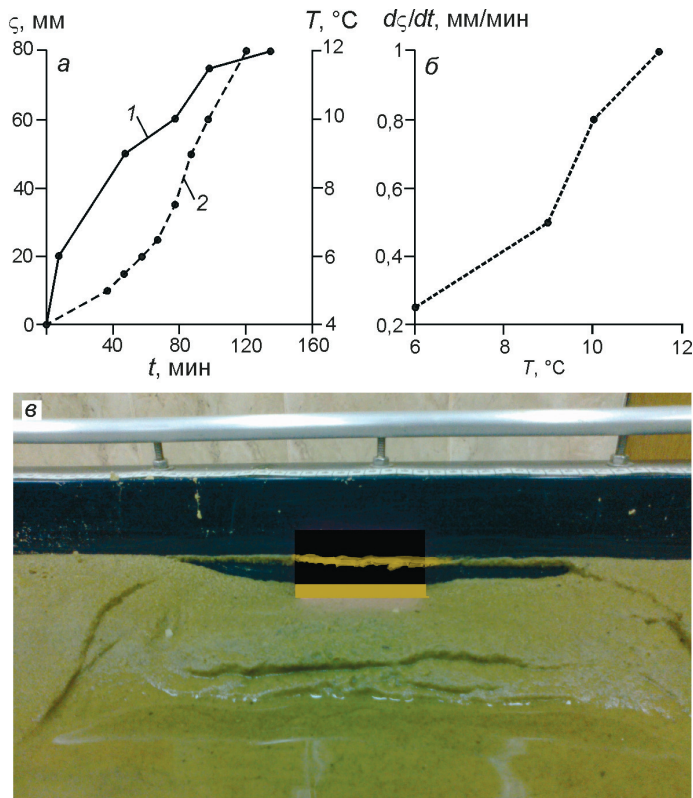


Рис. 3. Изменение температуры окружающего грунта (1) и величины эрозии (2) во времени (а), скорости эрозии от температуры грунта (б) и вид берегового склона в результате термоэрозии через 40 мин после начала лабораторного эксперимента (в)

Fig. 3. Change of the surrounding soil temperature (1) and erosion values (2) during the experiment time (a), the erosion rate of the soil temperature (б) and form of the coastal slope due to thermal erosion 40 minutes after the start of a laboratory experiment (в)

торных исследований в лотке с дном из песка с различным содержанием льда. С помощью этих же соотношений оценены размеры термического пограничного слоя и скорости термоэрозии для р. Лена. По данным математического моделирования, авторами работы [7] получена скорость эрозии при обтекании потоком с числом Рейнольдса $Re = 15\,900$ при температуре воды $5,5\text{ °C}$ в зависимости от содержания льда от $0,6\text{ мм/мин}$ (для чистого льда) до $1,6\text{ мм/мин}$ (при 20%-м содержании льда). Согласно результатам лабораторных экспериментов, эти величины изменялись от $0,7$ до $2,2\text{ мм/мин}$ соответственно.

С помощью нашей модели скорость эрозии легко получить, оценив изменение ширины русла во времени. Например, данные, приведённые на рис. 2, дают 1 мм/мин при температуре воды 9 °C и $0,7\text{ мм/мин}$ при 7 °C . Число Рейнольдса при этом равно $14\,000$. По результатам выполненного нами лабораторного эксперимента, скорость эрозии оценивается от $0,25$ до 1 мм/мин в зависимости от температуры окружающего грунта. Перед началом экспериментов грунт был охлаждён до температуры 4 °C . На рис. 3 приведены зависимости величины эрозии и температуры окружающего грунта от времени (см. рис. 3, а), скорости эрозии от температуры грунта (см. рис. 3, б) и вид берегового склона через 1 час проведения эксперимента с первоначально охлаждённым грунтом (см. рис. 3, в).

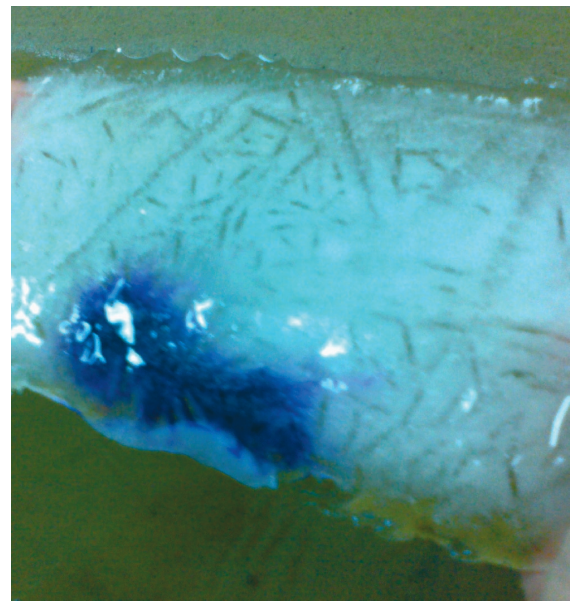


Рис. 4. Вид нижней ледяной пластины с примесью после 30 мин эксперимента

Fig. 4. The bottom ice plate with impurities (30 minutes after the start of a laboratory experiment)

При лабораторном эксперименте с примесью у нас не было возможности измерять концентрации. В задачу эксперимента входило визуальное наблюдение и измерение времени распространения за-

загрязнения при различном расположении его источника — в нижней или в верхней пластине. К сожалению, концентрация замороженного источника была недостаточной для измерения, а соблюдение временных масштабных соотношений оказалось практически невыполнимым. В обоих случаях в основном потоке можно было наблюдать лишь незначительные следы красителя в течение очень короткого времени. После окончания эксперимента при расположении источника в нижней пластине практически весь краситель оказался в грунте, при верхнем расположении он в основном растворился в объёме оставшейся пластины (рис. 4).

В связи с этим модельный блок, отвечающий за распространение примеси, был протестирован по данным, известным из описания сброса дизельного топлива в р. Ангара, произошедшего 25 апреля 2012 г. Информация о скорости распространения пятна загрязнения, значениях концентраций загрязнения, продолжительности и объёме сброса отслеживалась из информационных сообщений в Интернете [9–12]. Сначала были известны место утечки и приблизительная динамика повышения ПДК на водозаборе г. Свирск. Расчёты, сделанные по модели с использованием первоначальных данных об объёме (от 2 до 40 т) и продолжительности сброса в г. Усолье-Сибирское, не позволяли получить концентрации в конечном створе расчёта (г. Свирск) и время распространения примеси, которые соответствовали бы приводимым в информационных источниках. Зависимость концентраций примеси на поверхности воды (в единицах ПДК) в створе водозабора г. Свирск, расположенного в 60 км вниз по течению от г. Усолье-Сибирское, от времени, приведённая на рис. 5 и соответствующая наблюдаемой, была получена при задании исходного объёма, равного 300 т дизельного топлива, сбрасываемого в течение одних суток. В последующих сообщениях [12] эти цифры подтвердились, что может свидетельствовать о достаточной надёжности расчётов с используемым в модели алгоритмом.

Воздействие термической и механической эрозии на распространение примеси в русле исследовалось с помощью численного моделирования сценариев без наличия ледяных пластин и с таянием двух ледяных пластин, помещённых в береговой откос. Источник примеси помещался в центре потока, выше по течению от места размещения пластин. В результате формирования таликов, заполняемых потоком, переносящим примесь, условия равномерности потока нарушались, что приводило к нестационарности распространения примеси. При этом увеличение объёма исследуемого участка русла на 3% через 30 мин мо-

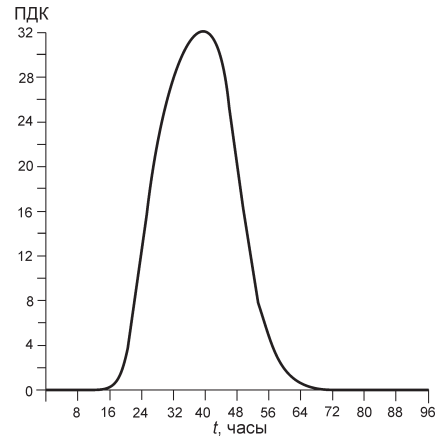


Рис. 5. Изменение превышения ПДК по нефтепродуктам во времени в створе водозабора г. Свирск на р. Ангара, рассчитанное по модели

Fig. 5. Change of the maximum permissible concentration of petroleum products in time at the site of water intake, the Svirk on Angara river, calculated by the model

дельного времени за счёт появления полостей в береговом откосе привело к росту суммарной концентрации примеси на этом участке на 8%.

Динамика распространения загрязнений при оттаивании источников, находящихся в мёрзлых берегах, исследовалась с помощью задания места расположения источника в одной из двух ледяных пластин. Отличия в процессе распространения примеси при положении источника в верхней и нижней пластине демонстрирует рис. 6. При действии постоянного источника в верхней пластине (см. рис. 6, а) через одно и то же время суммарная концентрация примеси на исследуемом участке в 2 раза ниже, чем при действии источника в нижней пластине (см. рис. 6, б). Это может свидетельствовать, что в нижней части потока из-за меньших значений скорости течения накопление концентраций более интенсивное.

Заключение

Разработанная математическая модель распространения примеси в потоках с деформируемыми руслами, сложенными многолетнемёрзлыми породами, позволяет адекватно описывать происходящие процессы и делать прогностические оценки их динамики в условиях изменения климата. Повышение температуры воды и воздуха, приводящее к изменениям русловых деформаций вследствие таяния мёрзлых грунтов и пластов льда, включённых в грунт, вносят изменения и в динамику переноса примесей водными потоками, о чём свидетельствуют материалы натурных наблюдений и лабораторные эксперименты. Это подтверждают и численные эксперименты с ис-

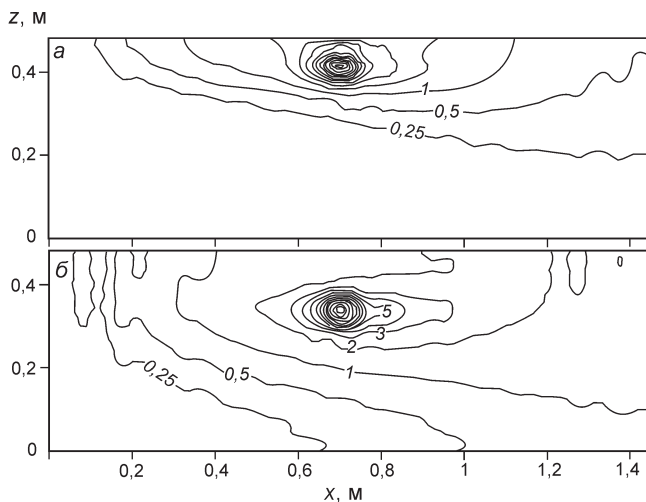


Рис. 6. Распределение осреднённых по глубине концентраций примеси в продольно-поперечной плоскости потока при начальном положении источника в верхней (а) и нижней (б) ледяных пластинах

Fig. 6. Distribution of the depth averaged concentrations of impurities in the longitudinal and transverse plane of the flow at the initial position of the source at the top (a) and bottom (b) of ice plates

пользованием математической модели, которые, в отличие от лабораторного и натурального экспериментов, позволяют получить более точные количественные оценки, а также установить наиболее значимые факторы, способствующие неблагоприятному развитию ситуации. В результате формирования таликов, заполняемых потоком, переносимым примесь, условия равномерности потока нарушаются, что приводит к нестационарности распространения примесей. Интенсивность распространения загрязняющих примесей в случае нахождения источника в оттаивающих участках берега в значительной степени зависит от глубины залегания источника в грунте и расположения потока относительно дна. Накопление концентраций более интенсивно происходит в нижней части потока из-за меньшей скорости его течения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 11-05-00393.

Литература

1. Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Гришук И.И., Масликова О.Я., Ионов Д.Н. Моделирование деформаций русел, сложенных мёрзлыми породами, при повышении температуры окружающей среды // *Лёд и Снег*. 2013. № 1 (121). С. 104–110.
2. Дебольская Е.И., Масликова О.Я., Исаенков А.Ю. Математическое моделирование деформаций русла в нижних бьефах ГЭС, расположенных в криолитозоне, при катастрофических наводнениях в условиях ледовых затруднений // *Природообустройство*. 2010. № 3. С. 51–58.

3. Котляков А.В., Гришук И.И., Масликова О.Я., Пономарёв Н.К. Экспериментальное исследование влияния льдистости грунтов, слагающих русло рек, на динамику берегового склона // *Лёд и Снег*. 2011. № 2 (114). С. 92–99.
4. Орлов А.С., Долгополова Е.Н., Дебольский В.К. Некоторые эмпирические закономерности русловой турбулентности // *Водные ресурсы*. 1985. № 6. С. 85–90.
5. Coastard F., Gautier E., Brunstein D., Hammadi J., Fedorov A., Yang D. Impact of the global warming on the fluvial thermal erosion over the Lena River in Central Siberia // *Geophys. Research Letters*. 2007. V. 34. L14501. doi:10.1029/2007GL030212
6. Dupeyrat L., Coastard F., Randriamazaoro R., Gailhardis E., Gautier E., Fedorov A. Effects of ice content on the thermal erosion of permafrost: Implications for coastal and fluvial erosion // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2011. V. 22. № 2. С. 179–187.
7. Dupeyrat L., Randriamazaoro R., Coastard F., Carey Gailhardis E. Variable rate modeling of fluvial thermal erosion // *Proc. of the Ninth Intern. Conf. on Permafrost / Ed. D.L. Kane and K.M. Hinkel*. 2008. V. 1. P. 391–395.
8. Randriamazaoro R., Dupeyrat L., Coastard F., Carey Gailhardis E. Fluvial thermal erosion: heat balance integral method // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2007. V. 32. Issue 12. P. 1828–1840.
9. www.mchs.gov.ru – Официальный сайт МЧС РФ.
10. <http://lenta.ru/news/2012/05/02/angara/> – Интернет-газета Лента.ру
11. <http://www.copah.info/news/uchenye-pomogut-s-likvidatsiei-utehki-dizelnogo-topliva-v-angaru> – Информационный портал СО РАН.
12. <http://www.vsp.ru/social/2012/05/05/521647> – Газета «Иркутский репортер»

Summary

A common problem for the Arctic region is pollution by persistent organic compounds and other substances that have accumulated over the years in these areas. With temperature increasing, these substances can get out of the snow, ice, permafrost in the human environment. With climate warming and permafrost degradation the risk of toxic substances from the burial sites of chemical and radioactive waste increases. The work is devoted to research the pollution propagation in the rivers flowing in the permafrost taking into account the possible deformations of the channels caused by the melting of the permafrost with increasing temperature of the river flow water. We also consider the distribution of pollutants released during erosion of the coastal slopes, caused thermal erosion. Numerical experiments confirmed the quantitative assessment obtained from the field observations of the erosion rate increases with increasing temperature. Study the impact of thermal and mechanical erosion of the distribution of impurities led to the conclusion that as a result of the formation of taliks uniform flow conditions are violated, resulting in a non-stationary distribution of impurities. The increase in the volume of the test section of the river due to the appearance of cavities in the coastal slope leads to an increase in impurity concentration. Analysis of the results of modeling the spread of contamination during thawing sources in the frozen shores, demonstrated the relationship in the process of distribution of impurities from the position of the source and allowed to give a preliminary quantitative assessment.