

15. Semenova O. M. Experience with modelling of runoff formation processes at basins of different scales using data of water-balance stations // Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins (Proc. of the Workshop held at Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March – 2 April, 2009). IAHS publ. 336. 2010. P. 167–172.

16. Vinogradov Y. B., Semenova O. M., Vinogradova T. A. An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system // Hydrological Processes. 2010, n/a. doi: 10.1002/hyp.7901.

17. Zhuravin S. A. Features of water balance for small mountainous watersheds in East Siberia: Kolyma Water Balance Station case study // Northern Research Basins Water Balance. IAHS publ. N 290. 2004. P. 28–40.

РАСЧЕТ ГЛУБИНЫ ПРОТАИВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД НА ПРИМЕРЕ о. САМОЙЛОВСКОГО (ДЕЛЬТА РЕКИ ЛЕНА)

Н. Н. Огородникова¹, И. В. Федорова²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт

В последнее время возрос интерес к процессам, связанным с глобальным изменением климата, что, в свою очередь, делает актуальным изучение гидрологических процессов на территориях распространения многолетнемерзлых пород. Климатические изменения в зоне вечной мерзлоты прежде всего сказываются на изменении глубины протаивания/промерзания.

Интерес к районам, расположенным в зоне распространения многолетней мерзлоты, также связан с хозяйственным освоением данных территорий. Стоит упомянуть, что площадь распространения многолетнемерзлых толщ горных пород в настоящее время составляет 25% всей суши земного шара и более 60% площади России. Однако вследствие малой плотности населения эти районы слабо охвачены гидрометеорологическими наблюдениями.

В данное время на территории России изучение мерзлых пород ведется на 4 опытных станциях: Якутской научно-исследовательской мерзлотной станции Института мерзлотоведения им. В. А. Обручева АН СССР, Северо-Восточной научно-исследовательской мерзлотной станции в г. Магадане, Игарской научно-исследовательской мерзлотной станции и опытной станции «Остров Самойловский» Института Арктики и Антарктики (Санкт-Петербург).

Для изучения глубины протаивания был выбран о. Самойловский (дельта р. Лена). Экспедиционные данные за период с 2003 по 2007 г. были предоставлены участниками Российско-Германского проекта «Лена», проводимого Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом и Германским институтом полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера.

Остров Самойловский (72°22' N, 126°28' E) расположен внутри огромной дельты р. Лена (рис. 1). Он является репрезентативным островом в активной и наиболее молодой части дельты и занимает площадь около 1200 га. Западное побережье острова характеризуется новыми аккумуляционными процессами, связанными с речной седиментацией. На восточной же береговой части острова доминирующими являются эрозионные процессы, которые формируют абразионное побережье. Около 70% поверхности этой части острова занимают отложения голоцена.

Климат южной части дельты Лены вместе с о. Самойловским характеризуется низкой среднегодовой температурой воздуха (–14,7 °С) и низким годовым количеством осадков (190 мм). Зимний сезон длится 9 месяцев, с конца сентября до конца марта ($T_{\text{ср}} = -30$ °С, $T_{\text{мин}} = -48$ °С). Зимний период характеризуется недостаточно высоким снежным покровом и сильными метелями.

Энергия для весенней снежной абляции обеспечивается суммарной радиацией. Более 50% доступной энергии теряется на сублимацию в результате действия сильного ветра.

Летний период длится 12 недель и отличается относительно высокими температурами ($T_{\text{ср}} = 7$ °С, $T_{\text{макс}} = 18$ °С) и постоянным освещением (так называемый полярный день).

Почвы характеризуются однородностью распространения. Для торфяных почв понижений типично положение грунтовых вод на уровне почвенной поверхности и преимущественно анаэробное накопление органического вещества. Исследование сухих почв показало низкое положение грунтовых вод, ниже которых происходит накопление органического вещества. Глубина протаива-

ния почв варьирует между 30–45 см [5]. На острове насчитывается несколько озер и много полигональных болот, которые занимают большие площади во всей юго-западной части дельты.



Рис. 1. О. Самойловский

Вследствие того что работа в зоне многолетней мерзлоты осложнена климатическими условиями и рядом других факторов, ощущается нехватка данных, что также осложняет изучение северных территорий.

В основном расчет глубин промерзания или протаивания производится по формуле Стефана, которая рассмотрена Ламе и Клапейроном с предположением, что температура талой зоны равна температуре фазовых переходов [1]:

$$h = \sqrt{\frac{2\lambda T_s \tau}{\rho \omega L_{ice}}}$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; T_s – температура поверхности почвы, °К; τ – продолжительность теплого периода, с; L_{ice} – удельная теплота таяния льда, Дж/кг; ω – влажность породы, кг/кг; ρ – плотность породы, кг/м³.

Помимо формулы Стефана, расчет толщины активного слоя производился по формулам Кудрявцева и Лейбензона. Выбор обусловлен тем, что при расчетах учитываются не только теплофизические свойства почв, но и теплооборот между атмосферой и почвой.

Вследствие того что в формуле Стефана пренебрегают теплоемкостью породы и не рассматривают теплоток, идущий снизу, была взята формула Лейбензона, в которой данные характеристики учитываются:

$$s = \sqrt{\frac{2\lambda_m |t_0| \tau}{Q_\Phi} + \frac{t_0^2 \lambda_T C_T \tau}{\pi Q_\Phi^2} - \frac{|t_1|}{Q_\Phi} \sqrt{\frac{\lambda_T C_T \tau}{\pi}}}$$

где t_1 – температура породы по разрезу, °К; t_0 – температура на поверхности почвы, °К; τ – время, с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К; C_T – коэффициент теплоемкости породы в талом со-

стоянии, Дж/м³·°К; Q_ф – удельная теплота фазовых переходов, Дж/кг, которую можно рассчитать по формуле:

$$Q_{\phi} = 334W_{\text{в}} \gamma_{\text{ск}},$$

где 334 – это теплота фазового перехода воды в лед и наоборот, кДж/кг; W_в – весовая влажность породы (льдиистость), %; γ_{ск} – объемная масса скелета породы.

Значения, полученные с использованием формулы Лейбензона, будут меньше результатов, полученных при помощи формулы Стефана, что является вполне закономерным, так как формула Лейбензона учитывает распределение температур в талой зоне перед началом ее промерзания или протаивания. Данное распределение температур замедляет движение фронта промерзания (протаивания), поскольку часть тепловой энергии идет на понижение (в случае промерзания пород) или повышение (в случае протаивания пород) температуры до температуры начала фазовых переходов.

Формула Кудрявцева была выведена автором при периодических колебаниях температуры на поверхности пород.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\lambda \tau}{\pi C} \ln \frac{A_0}{|t_{\text{ср}}|}},$$

где A₀ – годовая амплитуда температур на поверхности породы, °К; t_{ср} – среднегодовая температура на подошве слоя сезонного промерзания/протаивания, °К.

Преимущество этой формулы заключается в том, что здесь не учитывается теплота фазовых переходов Q_ф, которая в предыдущих случаях является достаточно большой величиной. Величина ε в данном случае представляет собой глубину проникновения нулевой изотермы.

Для анализа температуры воздуха и почвы на о. Самойловском был выбран теплый период 2005 г., в связи с тем что именно за этот промежуток времени имеется наибольшее количество данных. Результаты показали, что температура воздуха на высотах 0,5 м и 2 м от поверхности земли и температура на поверхности почвы имеют сходный характер, в то время как температура почвы на глубине 2,71 м изменяется плавно и увеличивается до 8 °С с июля по сентябрь из-за проникновения тепла в почву (рис. 2). Наиболее холодным был 2004 г., а самым теплым – 2003 г., наибольшая измеренная глубина протаивания достигла 0,17 м в июне 2004 г. и 0,46 м в сентябре 2006 г. (рис. 3). Рассчитанная по формуле Стефана глубина протаивания многолетнемерзлых пород о. Самойловского за период 2003–2007 гг. достигает максимального значения в июле 2003 г. и составляет 0,37 м, а в 2004 г. – 0,17 м.

Сравнение рассчитанных и измеренных данных (табл.) показало достаточно хорошую сходимость, но возможны некоторые неточности, связанные с проблемой осреднения и недостаточности данных измерений (рис. 4). Таким образом, формула Стефана может использоваться для расчета мощности активного (сезоноталого) слоя, но при необходимости получения средних за месяц и сезон данных. Для более точных, суточных и декадных, расчетов необходима разработка новых методов расчета, позволяющих использование данных современных автоматических измерений.

Другой проблемой, мешающей проведению точных модельных расчетов глубины протаивания/промерзания, является недостаточность экспериментальных станций, на которых производились бы измерения всех необходимых параметров и характеристик.

**Сравнение величины глубины протаивания,
рассчитанной по разным формулам,
и экспедиционных данных за теплый период 2004 г.**

Дата	Глубина протаивания, м			Экспедиционные данные, м
	по Стефану	по Лейбензону	по Кудрявцеву	
Июнь	0,10	0,13	0,17	0,13
Июль	0,31	0,14	0,17	0,26
Август	0,28	0,14	0,17	0,28
Сентябрь	0,12	0,13	0,17	0,13

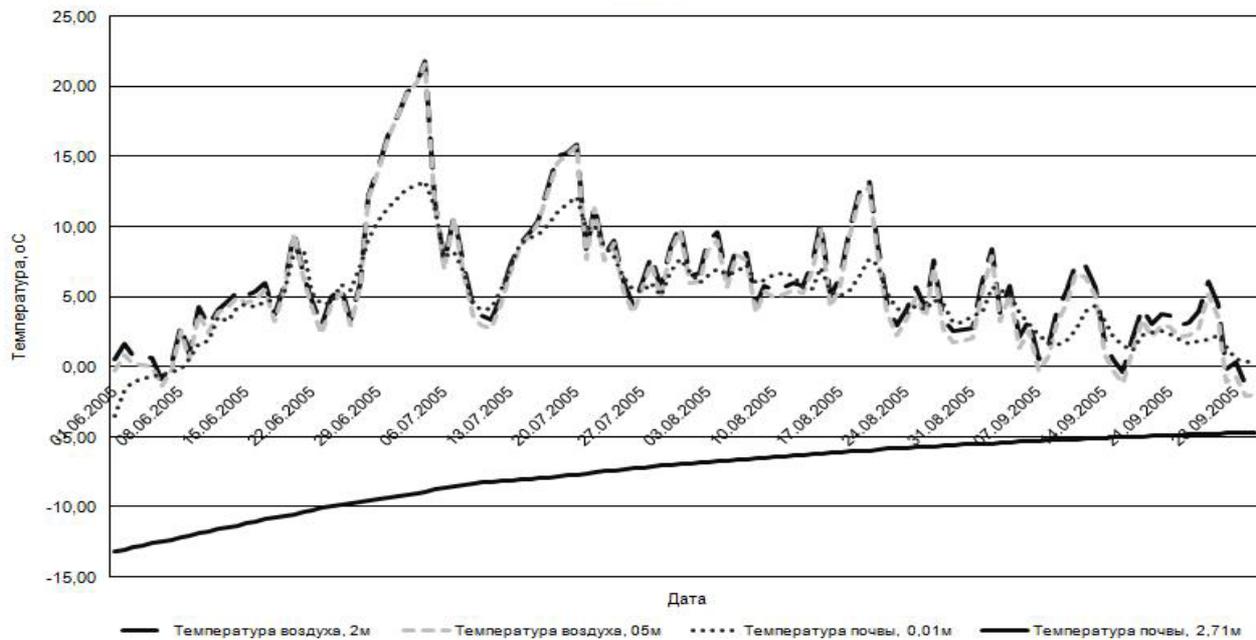


Рис. 2. Изменение температуры воздуха и почвы на разных горизонтах в 2005 г.

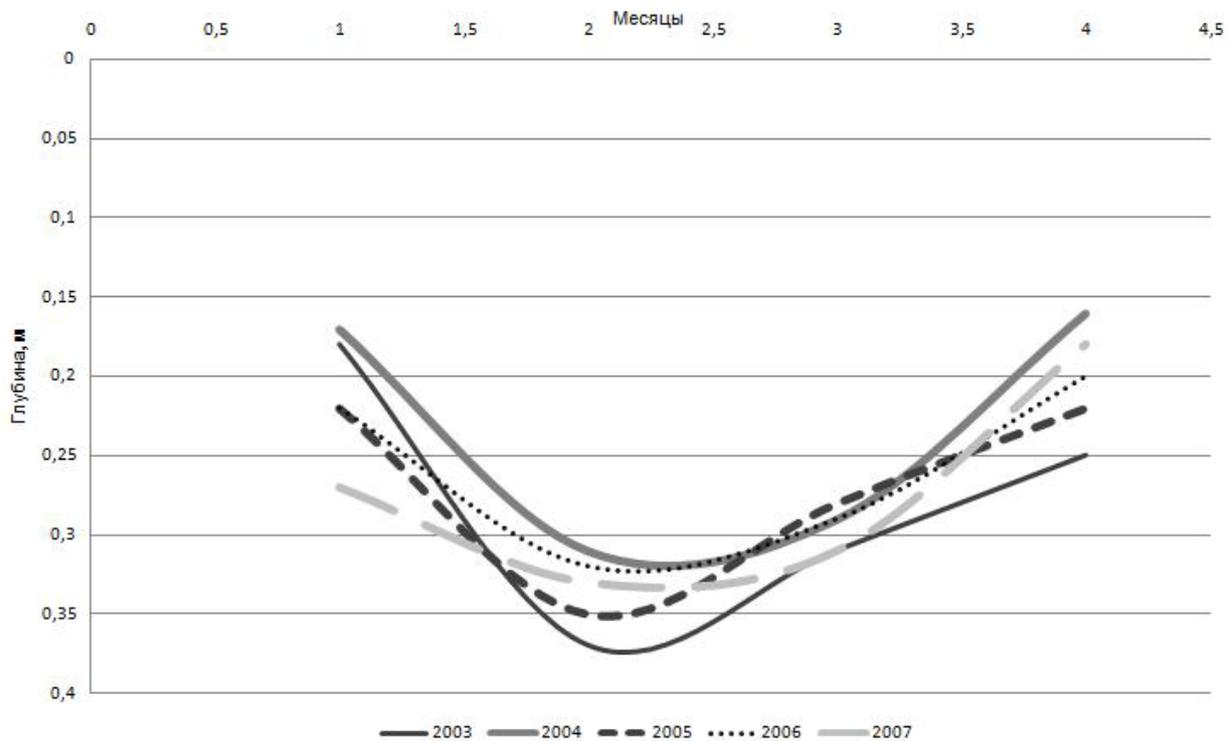


Рис. 3. Рассчитанная по формуле Стефана глубина протаивания (июнь – сентябрь 2003–2007 гг.)

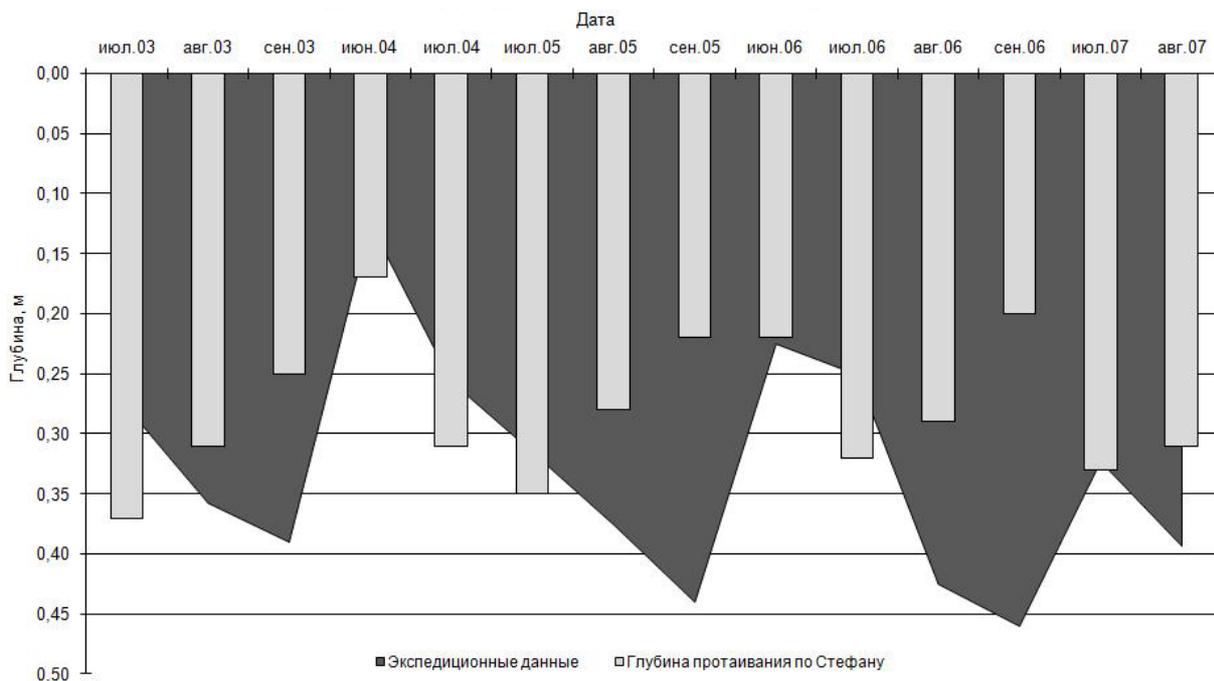


Рис. 4. Сопоставление рассчитанных значений глубины протаивания (по Стефану) и экспедиционных данных

В дальнейшем на основе данных станции о. Самойловского планируется разработка метода расчета мощности протаивания/промерзания с учетом современных данных и недостатков используемых моделей.

Литература

1. Аржанов М. М., Елисеев А. В., Демченко П. Ф., Мохов И. И. Моделирование изменений температурного и гидрологического режимов приповерхностной мерзлоты с использованием климатических данных (реанализа) // Криосфера Земли. 2008. Т. XI, № 4. С. 65–69.
2. Дугарцыренов А. В., Бельченко Е. Л. О динамике промерзания (оттаивания) массивов горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) № 3. М., 2009. С. 48–52.
3. Ершов Э. Д. Общая геокриология. М., 1990. 559 с.
4. Федорова И. В., Большинов Д. Ю., Макаров А. С. и др. Современное гидрологическое состояние дельты р. Лены // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития / Под ред. Х. Кассенс, А. П. Лисицына, Й. Тиде и др. М., 2009.
5. Hubberten H.-W., Wagner D., Pfeiffer E.-M. et al. The Russian-German Research Station Samoylov, Lena Delta // A Key Site for Polar Research in the Siberian Arctic. Polarforschung. 2003. 73 (2/3). P. 111–113.

ПРОЦЕССЫ ЗАХВАТА КРУПНЫХ ДОННЫХ ЧАСТИЦ ВИХРЯМИ В ПОТОКАХ ПРОРЫВА ПЛОТИНЫ

В. Н. Семенюк

Московский государственный университет

Экспериментально исследован придонный слой волны прорыва. Показано, что толщина вязкого слоя превышает диаметр донной частицы ($d_p < 1,2$ см). Мелкие частицы, $d_p < 0,045$ см, захватываются вихрями-спутниками, возникающими под основными вихрями, периодически формирующимися в вязком слое. Два вихря-спутника сближаются и сливаются в один вихрь, способный вместить большую частицу, если скорость потока выше критического значения U_{dip} . Захват частицы происходит при большем значении $U_{cr} > U_{dip}$, которое обеспечивает вращение частицы без проскальзывания.