

УДК 551.340

А.В. Уварова¹, И.А. Комаров², В.С. Исаев³, А.И. Тюрин⁴, М.М. Болотюк⁵**ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ СЕЗОННОГО ПРОМЕРЗАНИЯ***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1**ФГБУН Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН, 119991, Москва, ул. Косыгина, 19*
*Lomonosov Moscow State University, 119991, GSP-1, Leninskiye Gory, 1**V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, 119991, Moscow, Kosygin st., 19*

Приведены методики и результаты экспериментального исследования динамики температурного режима, величины мощности слоя сезонного промерзания и деформаций пучения пород за пятилетний период натурных наблюдений на территории Звенигородской биологической станции МГУ имени М.В. Ломоносова, а также результаты сопоставления с расчетными характеристиками, полученными с помощью методов численного моделирования процесса пучения.

Ключевые слова: сезонномерзлый слой, морозное пучение, температурный режим, численное моделирование.

The paper presents methods and results of experimental studies of the dynamic of the temperature regime, the thickness of active layer and rock heave deformation over a five-year field observations period, as well as the results of predictive modeling of these processes on the Moscow State University Zvenigorod Biological station. The results of comparison of field data with the calculated characteristics based on numerical modelling of heave process are presents.

Key words: active layer, frost heave, temperature regime, numerical modelling.

Введение. Научно-учебный стационар геологического факультета по полевым методам гидрогеологических, инженерно-геологических, геокриологических, инженерно-геофизических и эколого-геологических исследований расположен на территории Звенигородской биологической станции (ЗБС) Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Территория станции находится в государственном природном заказнике регионального значения и расположена в Одинцовском районе Московской области, приблизительно на 10 км западнее г. Звенигород, на правом берегу р. Москва. Ее территория охватывает разные геоморфологические уровни и ландшафты, на которых проявлены разнообразные геологические процессы, в том числе геокриологические, связанные с сезонным промерзанием и пучением пород. Основная цель нашей работы — выбор методик опробования пород и первичный совместный анализ результатов сопоставления натурного экспериментального исследования динамики температурного режима, величин мощности слоя сезонного промерзания и деформации пучения пород за пятилетний период натурных наблюдений с расчетными данными, полученными с

помощью методов численного моделирования рассматриваемых процессов.

Материалы и методы исследований. Методики полевых экспериментальных исследований. Площадки для измерения деформации пучения и глубины сезонного промерзания, как со снятым снежным и растительным покровом, так и в естественных условиях, расположены на разных геоморфологических уровнях: пойме, I и II надпойменных террасах р. Москва. Разрез поймы представлен четвертичными аллювиальными отложениями, преимущественно пластичными супесями с линзами песка (рис. 1, а). I надпойменная терраса сложена аллювиальными отложениями серебряноборской свиты (a_1III_{sb}). Они выполнены супесями, суглинками с прослойками песка и включениями гальки карбонатного состава, суммарная мощность может достигать 8 м (рис. 1, б). II надпойменная терраса выполнена аллювиальными отложениями мневниковской свиты (a_2III_{mnv}), представленными чаще всего песчаными отложениями общей мощностью около 12 м [Полевые ..., 2000]. Опытная площадка сложена суглинками, предположительно образовавшимися вследствие сползания моренных отложений с водораздела (gII_{ms}) или плоскостного смыва (dIV) (рис. 1, в).

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, аспирант; Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского, мл. науч.с.; e-mail: aleksandra.uvarova.95@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, профессор, докт. геол.-минер. н.; e-mail: ilya_komarov@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, ст. науч. с., канд. геол.-минер. н.; e-mail: tpomed@rambler.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, доцент, канд. геол.-минер. н.; e-mail: tjurin_alex@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, аспирант; e-mail: bolotuk93@gmail.com

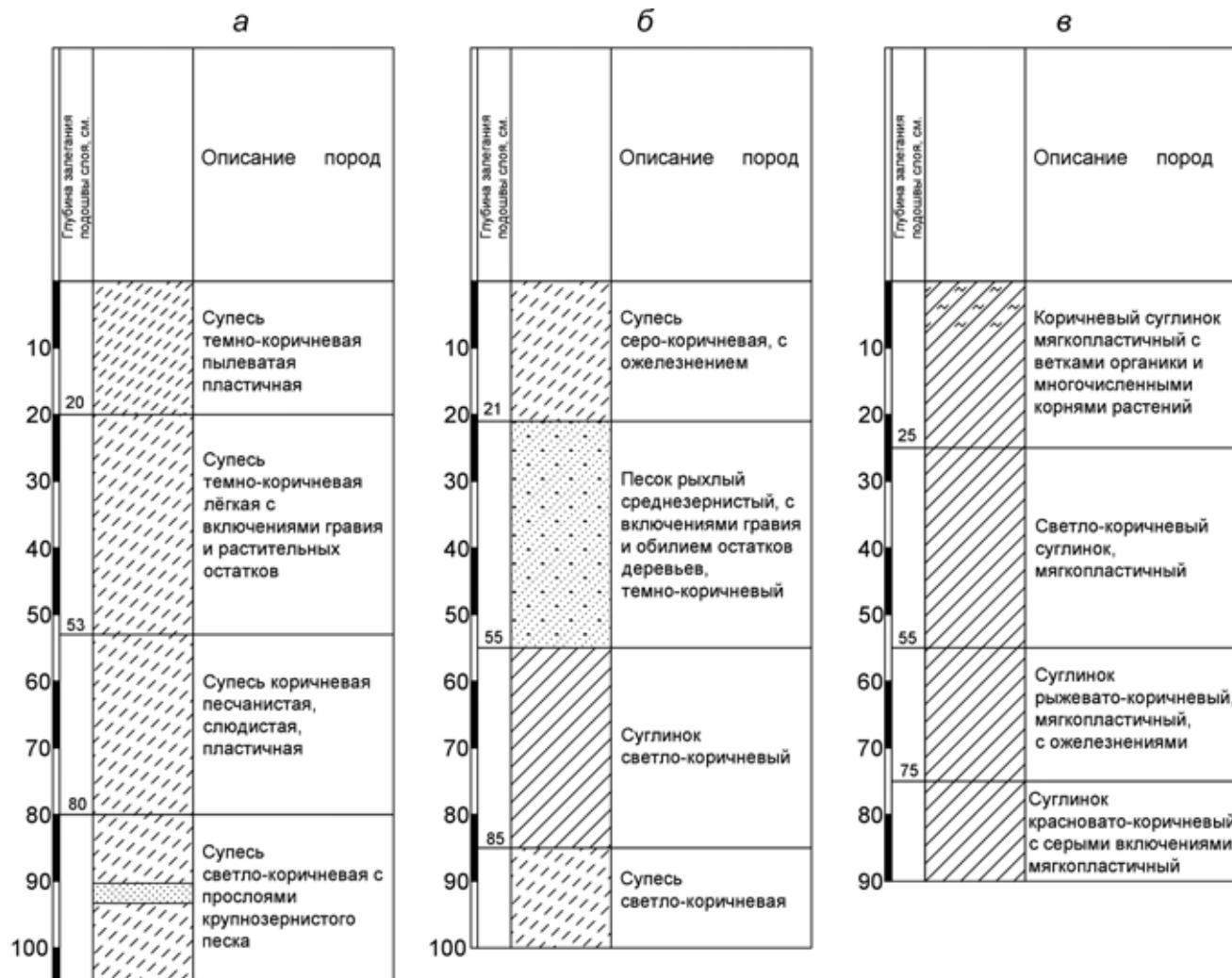


Рис. 1. Описание пород на площадках: *а* — пойма, *б* — I терраса, *в* — II терраса, по [Уварова и др., 2018]

Методика исследования температурного режима пород. Мониторинг пород проводился с использованием термометрических скважин, расположенных на I и II террасах, как непосредственно на специально оборудованных площадках, где измеряли величины деформации пучения и мощности слоя сезонного промерзания (СМС) со снятым растительным и снежным покровом, так и рядом с ними в естественных условиях. Скважины пробурены на глубину до 15 м, которая характеризует мощность слоя годовых амплитуд, и обрудованы пластиковыми кондукторами. В качестве температурных датчиков, расположенных с разным шагом по глубине, использованы электрические датчики сопротивления. Накопление данных за 5 лет осуществлялось с помощью логгеров фирмы «GeoPrecision GmbH» (Германия), которые можно подключать непосредственно к беспроводному мини-регистратору M-log5w-DALLAS или к I-log (с GPRS или без него) через адаптер SDI-12. [Уварова и др., 2018].

Мощность слоя сезонного промерзания на площадках определяли косвенными методами (термо- и электрокаротаж, мерзлотометр системы

Данилина) и заверяли данными бурения [Методы.... 1986].

Методика опытного определения вертикальных деформаций пучения СМС в целом аналогична той, которая описана в работе [Методы.... 1986]. Датчики были установлены в предзимний период на глубине 0,10; 0,15; 0,25; 0,35 и 0,55 м. Они представляют собой металлическую пластину площадью 64 см^2 , к середине которой приварен металлический стержень (репер). Чтобы в процессе промерзания репер не смерзался с грунтом, его изолировали полиэтиленовой трубкой, заполненной незамерзающей смазкой. Показания величин вертикальной деформации пучения во времени снимали относительно положения неподвижных реперов, установленных до начала зимнего периода на глубине ниже мощности слоя сезонного промерзания, которая для условий Подмосковья составляет 1,7 м.

Методики расчетного определения глубины сезонномерзлого слоя и величины вертикальных деформаций пучения. Определение мощности слоя сезонного промерзания для площадок, находящихся в натурных условиях, а также со снятым снежным

и растительным покровом проводили по методике, изложенной в работе [Комаров, Типенко, 1987], эта методика позволяет приближенно оценивать влияние динамики снегонакопления при наличии единичных и фрагментарных полевых данных снегомерной съемки. Решалась задача с явным выделением фронта промерзания, для полуограниченной среды, занимающей область $x \in (0, \infty)$, состоящей из трех зон: снегонакопления, мерзлой и талой. Граница между последними зонами задается во времени (τ) искомой функцией $\xi(\tau)$. На дневной поверхности температура меняется по произвольному закону $\phi(\tau)$. Теплофизические характеристики в зонах кусочно-постоянны. Математическая формулировка этой задачи сводится к решению нелинейной задачи типа Стефана:

$$\frac{\partial t_0(x, t)}{\partial \tau} = \alpha_0^2 \frac{\partial^2 t_0(x, t)}{\partial x^2}, \quad x \in (-h(\tau), 0); \quad (1)$$

$$\frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_1^2 \frac{\partial^2 t_1(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad x \in (0, \xi(\tau)); \quad (2)$$

$$\frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_2^2 \frac{\partial^2 t_2(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad x \in (\xi(\tau), \infty); \quad (3)$$

$$t_0(-h(\tau), \tau) = \phi(\tau); \quad (4)$$

$$t_2(x, 0) = \psi(x), \quad x \in (0, \infty); \quad (5)$$

$$\begin{cases} t_1(0, \tau) = t_0(0, \tau), \\ \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x}(0, \tau) = \lambda_0 \frac{\partial t_0}{\partial x}(0, \tau); \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} t_1(\xi(\tau), \tau) = t_2(\xi(\tau), \tau) = t_\phi, \\ \pm Q \frac{d\xi}{d\tau} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x}|_{x=\xi+0} - \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x}|_{x=\xi(\tau)-0}; \end{cases} \quad (7)$$

$$\int_{\xi(\tau)}^{\infty} (t_2(x, \tau) - gx - t_\phi)^2 dx < \infty$$

$$\text{или } |t_2(x, \tau)| < M; 008 \quad (8)$$

где t — температура; t_ϕ — температура фазового перехода (начала замерзания); h — мощность снежного покрова; λ и α^2 — коэффициенты теплопроводности и температуропроводности соответственно; Q — теплота фазовых переходов; 0, 1, 2 — индексы, обозначающие зоны снегонакопления, промерзающую и талую соответственно; gx — величина геотермического градиента. Условия (6) задают идеальный тепловой контакт на границе снежного покрова и промерзающей зоны, а соотношения (7) — условия на подвижной границе раздела промерзающей и талой зон. На нижней границе условие (8) задает либо геотермический градиент, либо предполагается ограниченность температуры.

Задача реализуется методом возмущений (малого параметра).

Для случая, когда динамику снегонакопления можно аппроксимировать параболическим законом $h = \beta(\tau)^{1/2}$ и считать, что температура поверхности не зависит от пространственной переменной x (линейный размер экспериментальной площадки мал), решение этой задачи при ограничении двумя членами асимптотического разложения в ряд по степеням малого параметра сводится к уравнению:

$$\xi(\tau) = \frac{-2Ca_1}{B + \sqrt{B^2 - 4AC}} \sqrt{\tau}, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} A &= 1 - \frac{\lambda_1 a_0}{\lambda_0 a_2} \operatorname{erf} \frac{\beta}{2a_0}, \\ B &= \sqrt{\pi} \frac{\lambda_1 a_0}{\lambda_0 a_2} \operatorname{erf} \frac{\beta}{2a_0} + \\ &+ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{c_1 |t_n|}{Q} \frac{a_1}{a_2} + \frac{c_2 |t_h|}{Q} \frac{a_2}{a_1} \right) > 0, \\ C &= \left(\frac{c_2 |t_h|}{Q} \frac{a_2 a_0 \lambda_1}{a_1^2 \lambda_0} \operatorname{erf} \frac{\beta}{2a_0} - \frac{c_1 |t_n|}{Q} \right) < 0, \end{aligned}$$

где t_h — температура на подошве слоя годовых амплитуд; t_n — температура поверхности, $\operatorname{erf}(x)$ — функция ошибок Гаусса.

Формула (9) удовлетворительно работает в широком диапазоне природных условий, когда значения параметра β , характеризующего значение мощности слоя снега в определенный момент времени, не превышают величины $\beta < 5 \cdot 10^{-3}$ м/час^{1/2}. При $\beta \rightarrow 0$ решение стремится к решению задачи без наличия снежного покрова на поверхности.

Методики расчетного определения значений вертикальных деформаций пучения. Для сопоставления с опытными данными использованы результаты расчетов по двум методикам: хорошо известной и общепризнанной методике В.О. Орлова и методике ДорНИИ. Принципиальная разница заключается в том, что в последней расчетные соотношения в явном виде содержат значения влагопроводных свойств пород, в то время как в первой их влияние опосредованно учитывается через комплекс характеристик грунта (число пластичности и т.д.).

Методика В.О. Орлова [Орлов и др., 1977] предполагает, что для районов, характеризующихся сезонным промерзанием грунтов, следует различать: 1) участки, сложенные грунтами, которые имеют предзимнюю влажность, равную или близкую полному водонасыщению соответственно, т.е. когда $W > W_{pr}$; 2) участки с неполным водонасыщением, когда $W \leq W_{pr}$.

Влажность W_{pr} — характерная расчетная влажность предела пучения незамерзшего грунта, определяемая по формуле

$$W_{pr} = 0,92 \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s \rho_d} + 0,08 W_W(t_k), \quad (10)$$

где ρ_d — плотность скелета грунта, $\text{г}/\text{см}^3$; W_W — содержание незамерзшей воды, t_k — температура прекращения пучения, определяемая по методическим разработкам. При краткосрочном прогнозе оценка величины пучения глинистого ненагруженного грунта при условии $W > W_{pr}$ выполняется по формуле

$$h = \frac{\rho_d z}{\rho_w} W_{изб} - 0,5 \cdot 10^{-2} \alpha_0 z^2, \quad (11)$$

где $W_{изб}$ — избыточное льдовыделение; ρ_w — плотность воды, $\text{г}/\text{см}^3$; α_0 — коэффициент сжимаемости немерзлого грунта, $\text{см}^2/\text{Н}$; z — глубина промерзания. Уменьшаемое уравнения (11) оценивает линейную деформацию за счет льдообразования, вычитаемое — за счет усадки мощности талой зоны вследствие обезвоживания. Для водонасыщенных пород величина $W_{изб}$ характеризует льдовыделение, которое обусловлено как замерзанием воды в порах с увеличением объема на 9%, так и долей воды, мигрирующей в зону промерзания. Ее значения определяются по методическим разработкам с использованием табулированных коэффициентов в зависимости от климатических условий и комплекса водно-физических параметров (полная влагоемкость грунта, верхний предел пластичности, число пластичности, плотность скелета грунта). Для случая, характеризующегося неполным водонасыщением пород, процесс пучения будет проходить в основном за счет мигрирующей воды. Исходя из этого величина избыточного льдовыделения будет определяться по формуле

$$W_{изб} = \psi_t (1,09 B - (W_{pr} - W)), \quad (12)$$

где B и ψ_t — параметры, определяющие миграционное льдонакопление, они определяются по методическим рекомендациям [Орлов и др., 1977].

Расчет величины пучения для трех исследовательских площадок на территории ЗБС проводился по методике ДорНИИ, адаптированной нами к условиям и механизмам реализации процессов пучения на опытных площадках. Общий вид расчетных формул имеет вид:

$$h = RJ (\tau_{пр})^{1/2}, \quad (13)$$

где $\tau_{пр}$ — период года с отрицательными значениями температуры; R и J — коэффициенты, первый зависит от климатических условий района, а второй — характеризует свойства пород и доминирующий механизм переноса влаги, определяющий миграционное льдонакопление, а следовательно, и величину вертикальной деформации пучения. Для площадки, расположенной на II надпойменной террасе, это перераспределение влаги в промерзающей зоне, для площадки на I

надпойменной террасе — влагоперенос за счет работы капиллярной «каймы», для площадки на пойме вблизи уреза реки — наличие неглубокого водоносного горизонта.

Площадка, расположенная на II надпойменной террасе. Поверхностный сток обеспечен. Грунт без признаков поверхностного заболачивания. Подземные воды не влияют на степень увлажнения и величину предзимней влажности (W_0), которая составляет <60% от влажности верхнего предела пластичности:

$$h = 0,15 D \sqrt{\tau_{пр}} \frac{W_0 - W_W}{(1-s)\sqrt{\alpha_0}} - 0,5 \cdot 10^{-2} \alpha_0 z^2, \quad (14)$$

где D — коэффициент диффузии незамерзшей воды, $\text{м}^2/\text{ч}$; $\tau_{пр}$ — период с начала промерзания почвы, час.; W — содержание незамерзшей воды при критической температуре прекращения пучения, рассчитывается по специальной методике; α_0 и S — параметры, зависящие от климатических условий и влажности, с учетом нормативной глубины промерзания ξ_{max} ; $\alpha_0 = 0,5 \cdot \xi_{max}^2 / \tau_{пр}$, $\text{м}^2/\text{ч}$; $S = 0,7$ д.е.

Площадка, расположенная на I надпойменной террасе. Поверхностный сток обеспечен. Подземные воды не влияют на увлажнение. Грунт без признаков поверхностного заболачивания. Предзимняя (W_0) влажность составляет менее 60% от влажности верхнего предела пластичности:

$$h = 0,013 (W_p - W_W) (D_k \tau_{пр})^{1/2}, \quad (15)$$

где W_p — весовое значение нижнего предела пластичности, %; D_k — коэффициент потенциалопроводности, характеризующий миграцию влаги к фронту промерзания за счет капиллярных сил, $\text{м}^2/\text{ч}$.

Площадка, расположенная на пойме. Подземные воды влияют на увлажнение независимо от условий поверхностного стока. Грунт с признаками заболачивания. Близкое залегание грунтовых вод:

$$h = 0,022 \left(\frac{D_k}{\alpha_0} \right) (W_{KB} - W_H^0) \left(H_{TB} \ln \frac{H_{TB}}{H_{TB} - \xi_{max}} - \xi_{max} \right), \\ H_{TB} > \xi_{max}, \quad (16)$$

где W_{KB} — влажность равная капиллярной влагоемкости, %, H_{TB} — глубина залегания грунтовых вод, м.

Результаты исследований и их обсуждение. На рис. 2 приведены результаты экспериментального определения динамики температурного режима пород для площадки за период наблюдений с 2013 по 2015 г. на разной глубине.

На основе данных мониторинга, приведенных на рис. 3, построены профили среднемесячных значений температуры (средневзвешенные значения) по глубине разреза для площадок, расположенных на I и II террасах. Среднегодовая температура пород составляла +6,5 °C, что относит площадку к

Рис. 2. Динамика температурного режима пород на I террасе на разной глубине, по [Уварова и др., 2018]

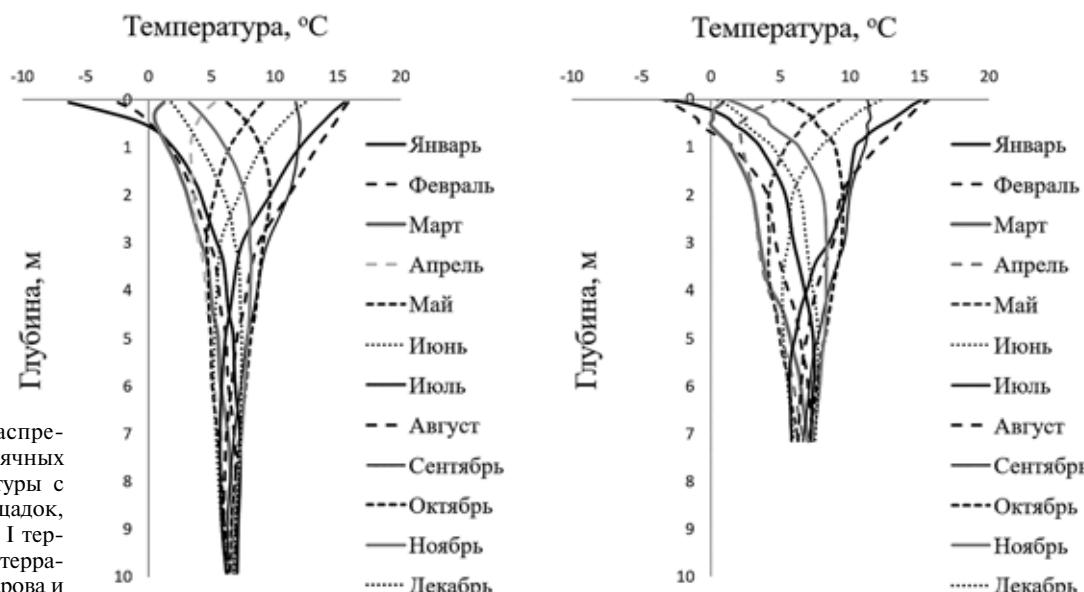
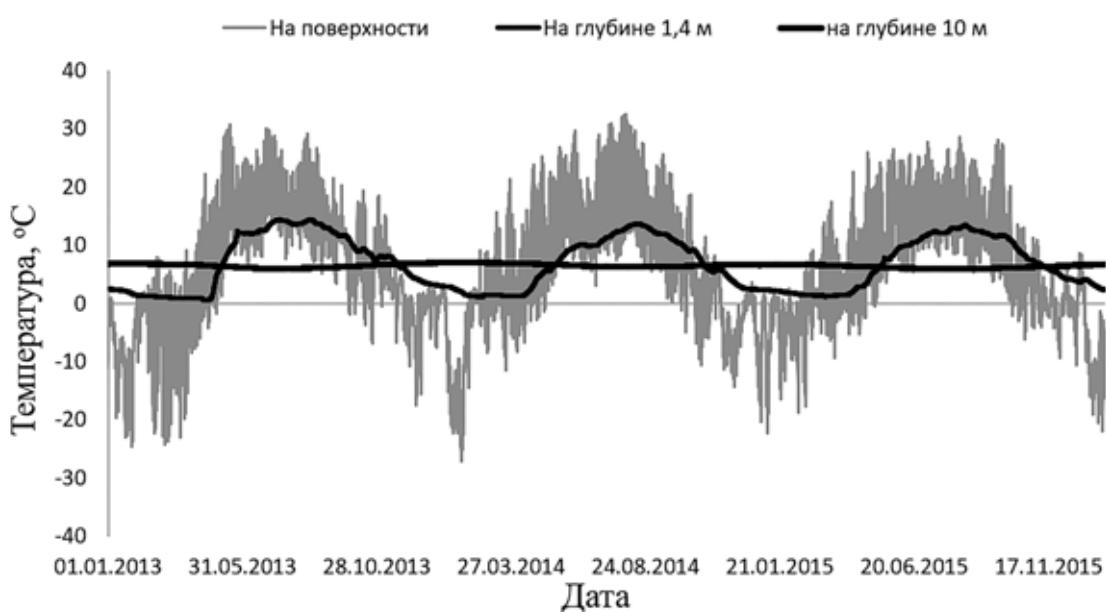


Рис. 3. График распределения среднемесячных значений температуры с глубиной для площадок, расположенных на I террасе (слева) и на II террасе (справа), по [Уварова и др., 2018]

зоне устойчивого сезонного промерзания, глубина годовых амплитуд ~ 12 м. Температурные профили использовали для экспериментального нахождения величины $\xi(\tau)$ по значению температуры начала замерзания пород (рис. 4), которая для незасоленных пород мало отличается от нуля, а также для расчетной оценки этой величины по соотношению (9) и значения вертикальной деформации пучения по соотношениям (14)–(16). Использование логгеров позволяет программировать временные шаги измерения температуры для предполагаемого периода наблюдений.

Анализ показал пестрый спектр значений изменения мощности СМС. Так, например, в табл. 1 приведены значения величины ξ на 22 января в разные годы, они изменяются от минимальных значений на площадках, находящихся в естественных условиях (массив практически незамерзший) в 2017 г., до ощутимых в 2016 г. В качественном

отношении снег отепляющее воздействует на температурный режим пород, но влияние величины мощности снежного покрова неоднозначно, поскольку необходимо учитывать его плотность, время периода с положительными значениями температуры (оттепели), влияние близкого положения уровня грунтовых вод (пойма). Все это приводит к тому, что мощность СМС — очень переменчивая величина, существенно зависящая также от темпа промерзания, направления хода процесса промерзание—оттаивание и динамики влажностного режима. Нахождение глубины промерзания с помощью мерзлотомера системы Данилина на площадках со снятым снежным покровом приводит к погрешности до 60% и более по сравнению с результатами термокаротажа, причем качественно, как правило, в сторону завышения, мы связываем это с влиянием конвекции воздуха в термометрической скважине.

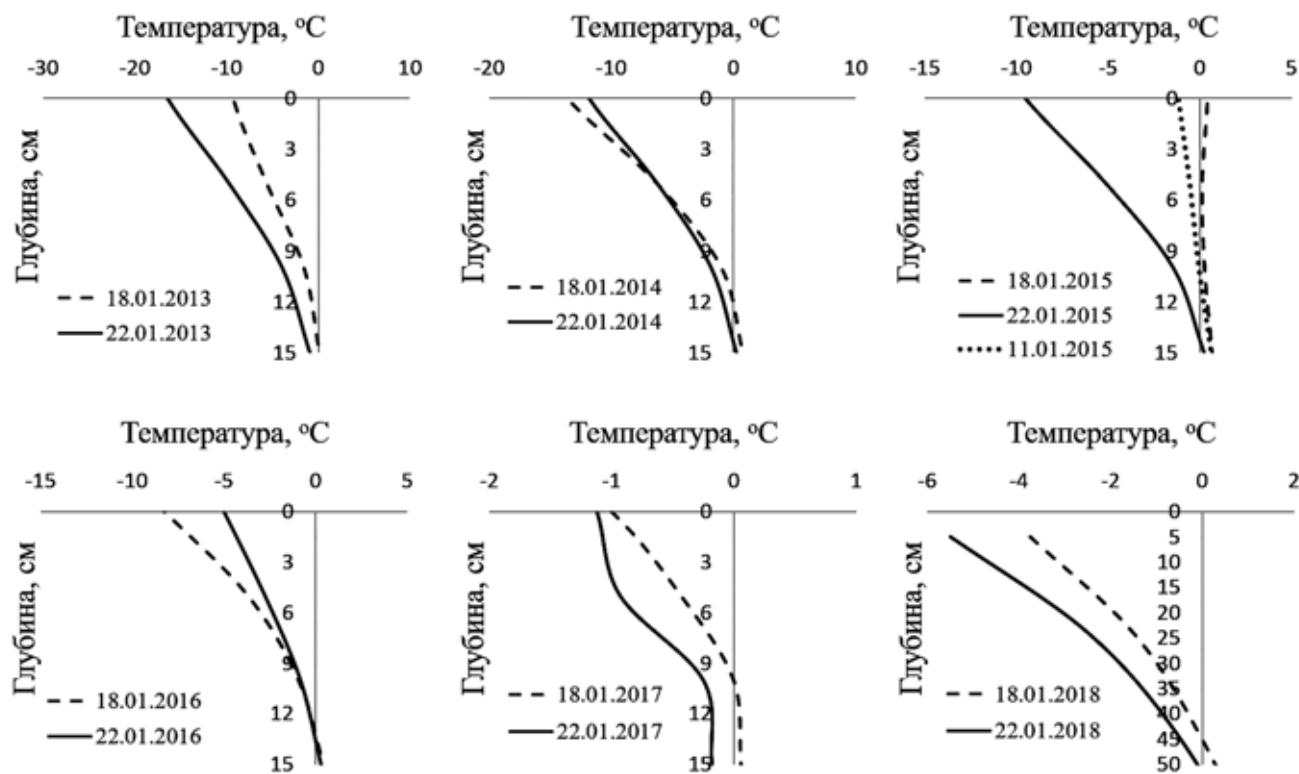


Рис. 4. Распределение значений температуры в слое сезонного промерзания в период полевых измерений (18–22 января) с 2013 по 2018 г. на I террасе

Таблица 1

Результаты измерений мощности слоя сезонного промерзания.

Геоморфологический уровень / растительность	Состав отложений	Год измерений	Средняя мощность снега, см	Глубина промерзания ξ , см	
				наличие снежного покрова / бурение	отсутствие снежного покрова / термокаротаж
Пойма / травянистая, встречаются одиночные деревья	супесь темно-коричневая пылеватая пластичная	2018	18	13	—
		2017	38	0	—
		2016	21	33	—
		2015	35	3	—
		2014	15	9	—
I надпойменная терраса / луговая	супесь светло-коричневая пылеватая пластичная	2018	15	6	25
		2017	35	1	35
		2016	28	18	24
		2015	21	12	15
		2014	12	9	12
II надпойменная терраса / древесная	супесь песчанистая серо-коричневая	2018	14	8	19
		2017	33	5	9
		2016	25	—	25
		2015	22	7	14
		2014	12	11	19

Примечание. Прочерк — отсутствие наблюдений.

Влияние динамики влажностного режима в СМС, периодов оттепелей, расчлененности, рельефа приводит к тому, что различные приближенные инженерные соотношения, основанные на решении задач типа задачи Стефана, например соотношения (9), а также формулы, рекомендуемые в нормативной литературе, не в полной мере отра-

жают основные природные факторы, влияющие на интенсивность процесса сезонного промерзания. Это видно из результатов сопоставления расчетных экспериментальных данных, приведенных в табл. 2. Данные о плотности и влажности пород получены путем опробования в предзимний период, осредненные значения температуры поверхности

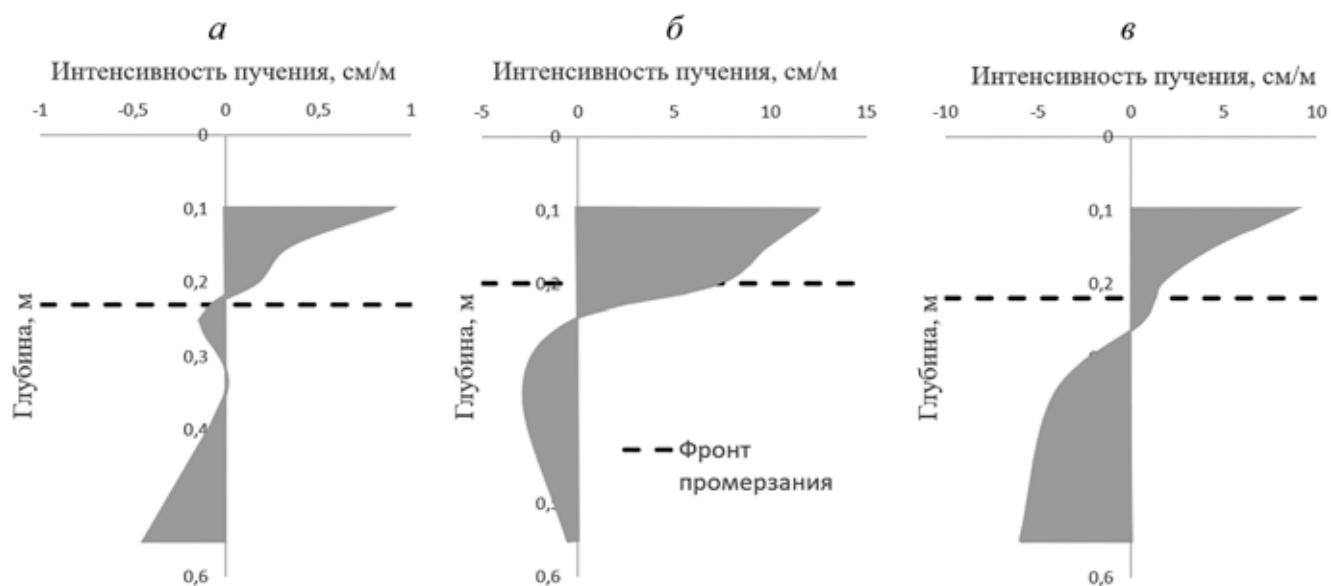


Рис. 5. Эпюры интенсивности вертикальных деформаций пучения с глубиной на пойме (а), I (б) и II (в) надпойменных террасах р. Москва в 2013 г.

пород и ее начальное распределение по глубине массива рассчитаны по данным термометрии. По этим же данным была установлена продолжительность периода с отрицательными значениями температуры поверхности пород. Расчет глубины сезонного промерзания выполнен для трех площадок с учетом динамики изменения мощности снежного покрова и для варианта, когда снежный покров отсутствует.

Как видно из анализа результатов, приведенных в табл. 2, погрешность расчетных и экспериментальных данных может достигать 100%. Существенная доля такой суммарной погрешности связана с параметрами расчетной схемы, в первую очередь с аппаратурными погрешностями нахождения величины теплопроводности промерзающих пород (влияние изменения фазового состава влаги в спектре отрицательных значений температуры) и сложностей учета временной изменчивости

величины снежного покрова, теплофизических характеристик, влажностного режима.

Результаты сопоставления расчетных и полевых данных для оценки вертикальных деформаций пучения. Для сопоставления результатов наиболее оптимальным решением было выбрать год, в котором измеренные деформации пучения наиболее характерны, по полученным результатам наиболее подходящим стал 2013 г. Согласно экспериментальным данным глубина сезонного промерзания на экспериментальных площадках в этом году в среднем составляла 20–25 см, поэтому вполне можно предположить, что деформации пучения будут фиксироваться на первых трех реперах от поверхности. На эпюрах вертикальной деформации пучения фиксируется как положительная деформация в промерзшей зоне (пучение), так и отрицательная деформация в талой зоне, характеризующая усадку в ней за счет обезвоживания,

Таблица 2

Результаты сопоставления расчетной и наблюдаемой глубины сезонного промерзания на 22 января 2019 г.

Наблюдательная площадка / плотность ($\text{г}/\text{см}^3$) / влажность (д. е.)	Расчетная глубина промерзания в естественных условиях, по формуле (9), м	Расчетная глубина промерзания по формуле (9), при $\beta=0$ (нормативная глубина), м	Полевые результаты измерений в естественных условиях, м	Полевые результаты, снятый снежный и растительный покров, м
Пойма / 1,44 / 0,25	0,120	0,159	0,13	0,17
I надпойменная терраса / 1,80 / 0,27	0,098	0,132	0,06	0,21
II надпойменная терраса / 1,96 / 0,33	0,212	0,235	0,09	0,15

Таблица 3

Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных на 22 января 2013 г.

Наблюдательная площадка	Расчетная величина пучения по методике В.О. Орлова, см	Расчетная величина пучения по методике ДорНИИ, см	Экспериментальное значение величины пучения, см
Пойма	0,19	0,13	0,08
I надпойменная терраса	1,2	0,98	1,66
II надпойменная терраса	0,79	0,74	0,87

связанного с эффектом миграции влаги к фронту промерзания (рис. 5). Результаты сопоставления экспериментальных и расчетных данных по двум методикам приведены в табл. 3.

В качестве продолжительности периода с отрицательными значениями температуры, который необходим при расчетах по обеим методикам, был выбран не весь зимний период, а время от его начала до момента проведения измерений (22 января). Начало зимнего периода отсчитано от 24 ноября 2012 г., когда значение температуры поверхности пород перешло через нулевую отметку (рис. 1). Таким образом, расчетный период с отрицательными значениями температуры составил 62 дня.

Анализ сопоставления данных, приведенных в табл. 3, показал, что, несмотря на принципиальное различие в описании процесса миграции влаги к фронту промерзания и определенные различия при учете влияния климатических факторов и характеристик пород, оба расчетных метода с приемлемой погрешностью можно использовать для прогнозирования величины вертикальной деформации пучения для площадок, которые расположены на I и II террасах. Для поймы погрешность расчетов, в частности по методике В.О. Орлова, может превысить 100%. На наш взгляд, это связано в первую очередь со способом учета влияния залегающего близко к поверхности водоносного горизонта. К недостаткам обеих методик расчета можно отнести специфику учета климатических факторов, например, в случае, когда на протяжении зимнего периода будут происходить периодические оттепели, а затем промерзания. К недостаткам можно отнести также сложность подбора значений коэффициента влагопереноса в методике ДорНИИ, поскольку небольшие изменения влажности пород приводят к изменению конечной величины пучения на порядок.

Выводы. 1. Среднегодовая температура пород на территории Звенигородской биостанции со-

ставляет $+6,5 \div +6,8^{\circ}\text{C}$, что позволяет отнести ее к зоне устойчивого сезонного промерзания. При сопоставлении данных о глубине промерзания за разные годы обнаружено, что породы на экспериментальных площадках на момент проведения измерений в 2013, 2017, 2018 гг. находились в стадии интенсивного промерзания. В 2015 г. вследствие продолжительного теплого периода во время зимы породы полностью оттали, а к моменту проведения измерений в январе снова начали промерзать.

2. Погрешность расчетных и экспериментальных величин глубины сезонного промерзания для зимы 2018/19 гг. может достигать ощутимых величин. Существенная доля такой суммарной погрешности связана с параметрами расчетной схемы, в первую очередь с аппаратурными погрешностями нахождения величины теплопроводности промерзающих пород (влияние изменения фазового состава влаги в спектре отрицательных значений температуры) и сложностями учета временной изменчивости величины снежного покрова, теплофизических характеристик, а также с влиянием периодических оттепелей. Это приводит к тому, что мощность СМС — динамичная величина, которая существенно зависит от скорости промерзания, направления хода процесса промерзания и оттаивания и, что важно, от влажностного режима.

3. Несмотря на принципиально различное описание процесса миграции влаги к фронту промерзания, а также различия при учете влияния климатических факторов и характеристик пород, методики расчетного определения величины пучения В.О. Орлова и ДорНИИ показали удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными для площадок, расположенных на I и II надпойменных террасах. Существенная погрешность для площадки, расположенной на пойме, объясняется способом учета влияния залегающего близко к поверхности водоносного горизонта. Необходим дальнейший, более углубленный анализ полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Комаров И.А., Типенко Г.С. Решение задачи промерзания—оттаивания при наличии изоляции на поверхности // Геокриологические исследования. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. С. 260–280.

Методы полевых геокриологических исследований: Методическое пособие / Под ред. Э.Д. Ершова и Г.И. Гордеевой. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 143 с.

Орлов В.О., Дубнов Ю.Д., Меренков Н.Д. Пучение промерзающих грунтов и его влияние на фундаменты сооружений. Л.: Стройиздат, 1977. 184 с.

Полевые методы гидрогеологических, инженерно-геологических, геокриологических, инженерно-геофи-

зических и эколого-геологических исследований // Под ред. В.А. Королева, Г.И. Гордеевой, В.А. Богословского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 352 с.

Уварова А.В., Комаров И.А., Исаев В.С. Закономерности динамики температурного режима и сезонного промерзания на Звенигородской биостанции за пятилетний период наблюдений // Актуальные проблемы геокриологии. Т. 1. М.: КДУ, 2018. С. 201–206.

Поступила в редакцию 24.09.2019

Поступила с доработки 00.00.2020

Принята к публикации 00.00.2020