

УДК 551.345, 624.139

О.Г. Кистанов¹

ВЛИЯНИЕ ПЕСЧАНОЙ НАСЫПИ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ

Выполнено моделирование влияния планировочных насыпей на температурный режим грунтов на участках сливающегося и несливающегося типов мерзлоты. Грунтовые условия рассмотрены на примере Заполярного месторождения. Выявлена зависимость температурного режима от уровня грунтовых вод и мощности водонасыщенного слоя насыпи в зимний и летний периоды. Определены наиболее благоприятные условия обводнения насыпи для повышения и понижения температуры грунтов.

Ключевые слова: уровень грунтовых вод, насыпные грунты, температурный режим, прогнозная модель.

Impact of the water absorption bulk soil on the temperature regime on the sites of continues and discontinues type of permafrost was modeled. Ground conditions are considered on the example of the Zapolyarnoye field. The dependence of the temperature regime of the ground water level and capacity of the water-saturated embankment layer in winter and summer was exposed. The most favorable conditions of irrigation of embankments for raising and lowering the temperature of the soil were determined.

Key words: groundwater level, embankments, temperature regime, expected model.

Введение. Опыт эксплуатации сооружений показывает, что инженерно-геокриологические условия изменяются и не соответствуют тем, которые существовали на момент изысканий. При этом изменения условий в грунте могут носить такой характер, что состояние грунтового основания после нескольких лет эксплуатации не удовлетворяет проектным решениям [Выполнение..., 2007]. Основные факторы, влияющие на температуру грунта, — внешние граничные условия (температура воздуха, глубина снежного покрова, наличие растительности и др.) [Инженерная геокриология, 1991; Методика..., 1979]. Не менее важно учитывать влияние глубины залегания уровня надмерзлотных вод и мощности водонасыщенного слоя в насыпных грунтах на температурный режим мерзлых грунтов [Результаты..., 2010].

В ходе моделирования исследовалось влияние водонасыщенности в возведенных насыпях на температурный режим грунтов оснований на глубине годовых нулевых амплитуд (10—11 м), а также на глубину сезонноталого или многолетнего протаивания грунтов. Рассмотрены территории с эстакадами, мачтами, незастроенными участками, которые находились за пределами области влияния сооружений с проветриваемыми подпольями.

Расчет теплового поля подстилающих грунтов выполнен с использованием программы HEAT, разработанной на кафедре геокриологии под руководством Л. Н. Хрусталёва.

Основная функция программы — решение нестационарного нелинейного дифференциального урав-

нения теплопроводности методом конечных разностей. Результат решения — температурное поле пород в заданные моменты времени и в заданных точках пространства. Решалась одномерная задача, так как расчетная область имеет горизонтальную поверхность и постоянные теплофизические свойства грунта; боковое влияние от сооружений на температурное поле расчетной области не учитывали.

Постановка задачи. Граничные условия. При решении задачи на *верхней границе* были заданы граничные условия 3-го рода — среднемесячные значения температуры воздуха согласно данным табл. 1 с учетом радиационной поправки на инсоляцию поверхности насыпи в летние месяцы [Инженерная геокриология, 1991]. На *нижней и боковой границах* заданы граничные условия 2-го рода (на глубине 30 м теплоток равен нулю). Температурный режим принят периодически установившимся на весь период прогноза, без учета изменения климата.

Влияние на теплообмен теплоизолирующих покровов (величина, обратная термическому сопротивлению [$\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$]) определяли в задаче через термическое сопротивление снега по соответствующих высоте и плотности снега.

Распределение и характер снегонакопления на территории УКПГ изучены в ходе проведения площадных снегомерных съемок и ежемесячных наблюдений начиная с 2006 г. Выбраны два характерных типа участков с разной высотой снежного покрова, на которых не производилось уплотнение или уборка снега.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, аспирант; e-mail: kisolgen@rambler.ru

Таблица 1

Значения температуры дневной поверхности насыпи в течение года с учетом радиационной поправки, °С

Месяцы											
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-23,9	-24,6	-16,1	-9,7	-0,8	15,4	19,5	15,5	8,3	-4,0	-17,0	-23,9

Первый тип — участки, где высота снежного покрова не превышает 0,50 м в течение зимнего периода (продуваемые участки между дорогами и под эстакадами). Второй тип — участки, на которых высота снежного покрова не превышает 0,75 м, характерен для территории, где происходит снегозадержание за счет конструктивных особенностей сооружений и их расположения. На территории установки комплексной подготовки газа (УКПГ) плотность снежных отложений более высокая, чем в естественных условиях. Это связано с перераспределением снежного покрова в пределах застроенной территории под влиянием ветрового режима в течение зимнего периода. Месячные значения высоты снега и его плотности представлены в табл. 2.

Характеристика области исследования. В результате анализа геокриологического строения мерзлых толщ по глубине залегания, среднегодовых значений температуры грунтов, наличия сливающихся и несливающихся типов многолетнемерзлых пород (ММП) на территории под площадки УКПГ были выбраны 4 типа разреза с насыпью высотой 1,0 и 2,0 м для каждой грунтовой толщи. В зависимости от состава, льдистости, влажности грунтов выделены 10 инженерно-геологических элементов (рис. 1):

— разрез Ia — суглинки с прослоями песков и глин; кровля ММП заглублена до 7,0 м; мощность сезонномерзлого слоя (СМС) составляет 1,0 м. Этот разрез выбран для расчетов как наиболее потенциально опасный и, возможно, наиболее динамично изменяющийся под влиянием внешних факторов, что неблагоприятно для оснований, расположенных в подобных условиях;

— разрез Ib — суглинки с прослоями песков и глин; сливающийся тип ММП, мощность сезонноталого слоя (СТС) 1,8 м. Разрез выбран как наиболее характерный на изучаемой территории;

— типовой разрез IIa — суглинки с прослоями песков и глин, которые с глубины 6,0 м подстилаются мелкими песками; кровля ММП заглублена до 4,0 м; СТС 2,0 м;

— типовой разрез IIб — суглинки с прослоями песков и глин, которые с глубины 6,0 м подстилаются мелкими песками, сливающийся тип ММП, СТС 1,5 м.

Теплофизические характеристики грунтов по разрезам приведены по СНиП 2.02.04-88 с учетом лабораторных исследований физико-механических свойств [Выполнение мерзлотных..., 2007].

Характеристика насыпных грунтов. Работы по созданию насыпи на площадке под УКПГ-3С (типичные разрезы Ia, Ib) начались в апреле 2002 г. и закончились в апреле 2003 г.; под УКПГ-2С (типичные разрезы IIa, IIб) начались в апреле 1999 г. и завершились в ноябре 2001 г. Отсыпка производилась песчаным грунтом из заготовленных гидронамывом буртов и осуществлялась на ненарушенный почвенно-растительный покров и мерзлые грунты основания. Расчет проведен для насыпи мощностью 1,0 и 2,0 м, т.е. минимальной и типичной для этих площадок. Начало расчетов для грунтов Ia и Ib — с 15 мая 2002 г.; для грунтов типовых разрезов IIa и IIб — с 15 мая 1999 г. в соответствии с тем, что эти сроки — ближайшая дата проведения термометрических наблюдений в скважинах во время инженерно-геологических изысканий. Физические и теплофизические свойства песка в насыпи представлены в табл. 3.

Глубина залегания уровня грунтовых (надмерзлотных) вод в насыпи. На основе данных натурных наблюдений, полученных во время мониторинга на площадках УКПГ в осенне-зимний период 2006—2011 гг., и изучения условий дренажа и аккумуляции грунтовых вод установлено, что в площадных насыпях практически с горизонтальной поверхностью, отсыпанных мелкозернистым пылеватым песком, в летне-осеннее

Таблица 2

Характеристики снежного покрова на застроенной территории

Тип	Характеристики	Месяцы						
		XI	XII	I	II	III	IV	V
1	Высота снега, м	0,15	0,30	0,35	0,50	0,45	0,50	0,20
	Плотность снега, кг/м ³	250	350	400	420	450	500	550
2	Высота снега, м	0,20	0,50	0,60	0,70	0,65	0,75	0,35
	Плотность снега, кг/м ³	300	400	450	480	510	550	600

Таблица 3

Физические и теплофизические свойства песка в насыпи, по [Инженерная геокриология, 1991]

Наименование грунта	Суммарная влажность грунта, W_{tot} , %	Плотность сухого грунта, ρ_d , г/см ³	Коэффициент теплопроводности грунта, Вт/м·ч·°С		Объемная теплоемкость грунта, Вт/м ³ ·°С		Объемная теплота фазовых переходов, Вт/м ³	Температура фазового перехода, °С
			талого	мерзлого	талого	мерзлого		
Песок мелкий	10	1,54	1,56	1,70	523,2	410,4	15 610	0,0
Песок мелкий	20	1,54	1,99	2,34	707,9	523,4	30 875	0,0

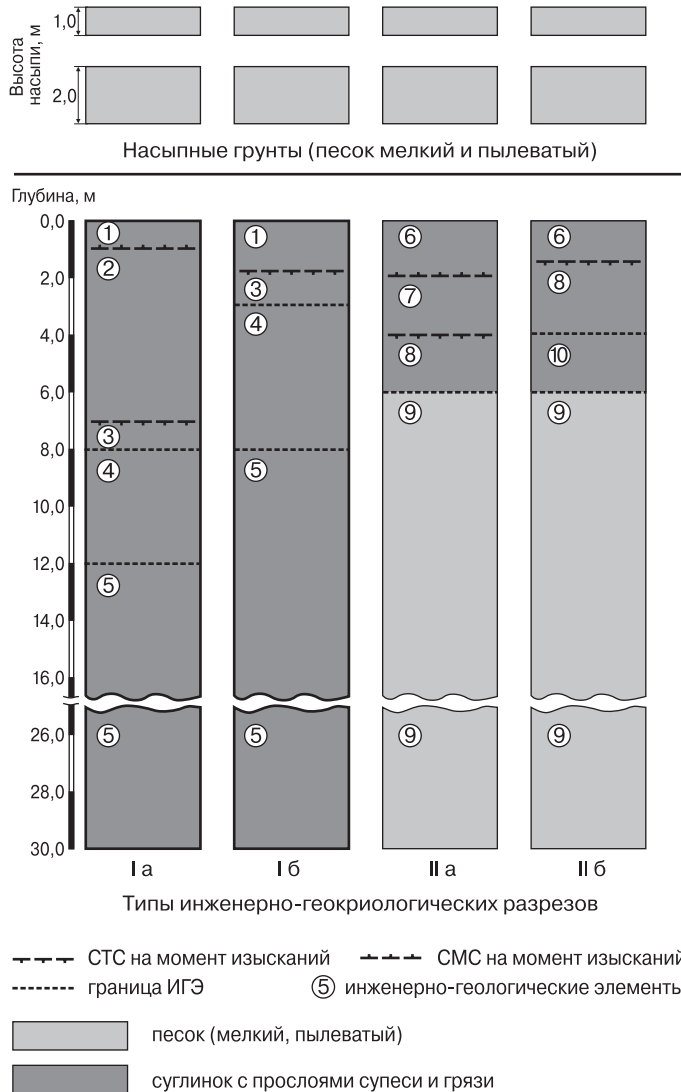


Рис. 1. Инженерно-геокриологические разрезы для расчетной области

время существует горизонт застойных грунтовых (надмерзлотных) вод. Исключение составляют краевые участки насыпи, где к началу зимы происходит дренирование (сработка) горизонта. Его питание осуществляется практически полностью за счет атмосферных осадков. Уровень залегания горизонта в насыпях высотой 1,0 м часто находится на глубине 0,3–0,5 м и в летнее, и в предзимнее время, реже в интервале 0,5–1,0 м. В насыпи высотой 2,0 м уро-

вень грунтовых вод (УГВ) залегает часто на глубине 1,0–1,5 м и реже в интервале 0,5–1,0 м. При решении задач глубину залегания УГВ задавали границей значений влажности песка. Над границей ее принимали равной 10% (по данным полевых опробований), ниже — 20%, влажность — близкая к значению полного водонасыщения этого песка.

Для отсыпки в 1,0 м рассмотрено 6 вариантов глубины залегания УГВ, которые представлены в табл. 4. Для отсыпки в 2,0 м рассмотрено 10 вариантов расположения УГВ, представленных в табл. 5.

Характеристика температуры грунтов. Температура грунтового разреза на соответствующий начальный момент прогноза задавалась по данным, полученным во время проведения инженерно-геологических изысканий на территории, которая зарезервирована под застройку. Рассмотрены четыре варианта температуры грунтов на глубине 10 м. Для типовых разрезов Ia и IIa с погруженной кровлей ММП температуру принимали равной $-0,3$ °С; для разрезов IIб и IIб — $-0,5$, $-1,0$ и $-1,5$ °С. Насыпные пески изначально талые, температура в теле насыпи на начальный момент расчета составляла $2,0$ °С.

Указанные значения температуры характеризуют геотемпературный режим в естественных условиях для большей части грунтов, который был установлен при проведении термометрических исследований во время изысканий.

Результаты исследований и их обсуждение. Прогноз составлен без учета миграции влаги и конвективного теплообмена в грунтах, моделирование осуществлялось в перспективном плане. Расчетный срок для прогноза составлял 30 лет. Показатели расчетных значений температуры грунтов после создания отсыпки с известным режимом УГВ в насыпи и глубина СТС/СМС фиксировались на 15 октября через 5, 10, 20 и 30 лет после устройства насыпи.

Для всех участков с несливающимся типом мерзлоты при высоте снежного покрова 0,75 м — вне зависимости от высоты насыпи и режима УГВ — происходит постепенное повышение температуры грунта на глубине 10 м до $-0,2$ °С (рис. 2).

При высоте снега 0,5 м и насыпи 1,0 м и глубине УГВ на 0,3–0,5 м (в летнее и предзимнее время) происходит незначительное понижение среднегодовой температуры (t_{cp}) — на $0,1$ °С и увеличение глубины сезонного промерзания грунтов на 0,2–1,0 м и $>1,0$ м

Таблица 4

Положение уровня надмерзлотных вод в насыпи высотой 1,0 м

Уровень грунтовых вод, м	Номер варианта					
	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6
Летний период	1,0	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3
Зимний период	1,0	0,5	1,0	0,3	0,5	1,0

Таблица 5

Положение уровня надмерзлотных вод в насыпи высотой 2,0 м

Уровень грунтовых вод, м	Номер варианта									
	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9	2-10
Летний период	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
Зимний период	2,0	1,5	2,0	1,0	1,5	2,0	0,5	1,0	1,5	2,0

с новообразованием слоя ММП в интервале глубины 2,2—4,0 м. На этих же участках, но с высотой насыпи 2,0 м тенденция к понижению t_{cp} сохраняется, а увеличение глубины сезонного промерзания зависит от положения УГВ к началу промерзания, т.е. чем глубже уровень, тем больше глубина промерзания.

На участках с инженерно-геологическим разрезом типа Ib с начальными значениями среднегодовой температуры ММП от -0,5 до -1,5 °C при высоте насыпи 1,0 и 2,0 м, снега 0,5 м при всех вариантах УГВ происходит понижение температуры по разрезу по сравнению с начальными условиями (рис. 3). Минимальная температура на глубине 10 м на 30-й год существования насыпи будет составлять -2,3 °C, а максимальная — -1,2 °C. Глубина СТС для отсыпки высотой 1,0 м лежит в интервале от 1,9 до 2,1 м, а для насыпи в 2,0 м — от 1,8 до 2,3 м.

При высоте снежных отложений 0,75 м происходит растепление грунтовой толщи, которое сопровождается переходом сливающегося типа мерзлоты в несливающийся. Наибольшее погружение кровли до глубины 7,5 м происходит при УГВ на 0,5 м в летний и зимний периоды (рис. 4).

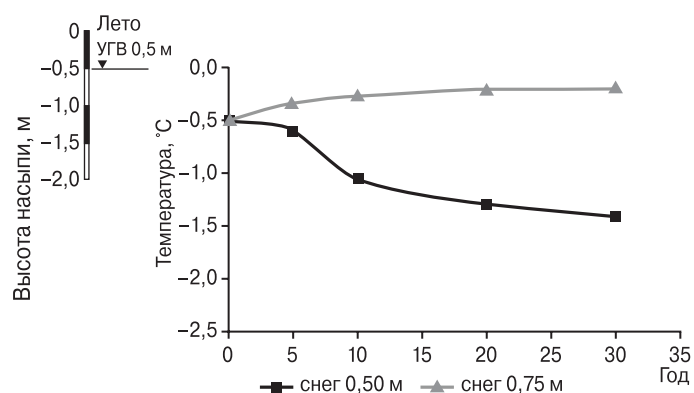


Рис. 3. Прогнозные температуры грунтов под влиянием насыпи с постоянным уровнем грунтовых вод на глубине 0,5 м в зависимости от высоты снежного покрова

На участках с геокриологическим разрезом Ib с высотой насыпи 1,0 м, снега 0,50 и 0,75 м для всех вариантов УГВ происходит повышение температуры по разрезу. На глубине 10 м на 30-й год существования

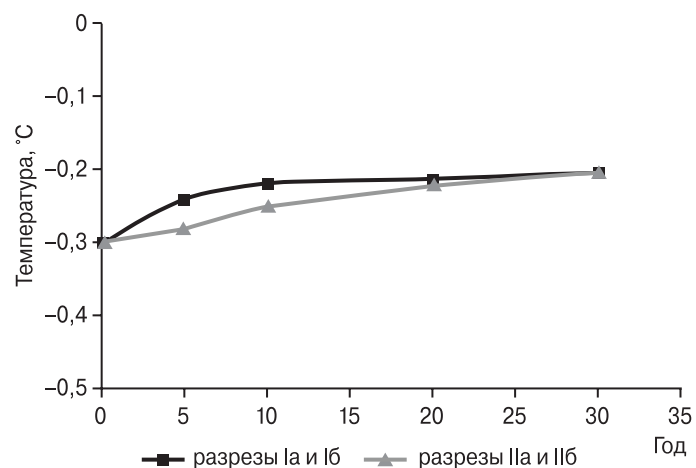


Рис. 2. Изменение температуры на глубине 10 м для участков с несливающимся типом мерзлоты

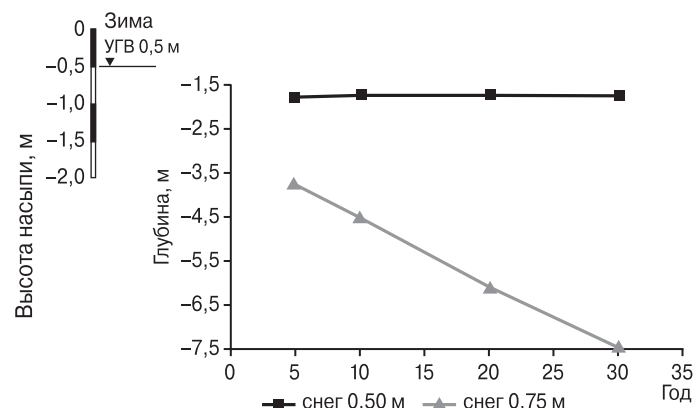


Рис. 4. Динамика мощности сезонноталого слоя и глубины залегания кровли ММП при постоянном уровне грунтовых вод в зависимости от высоты снежного покрова

насыпи она достигает $-0,2^{\circ}\text{C}$. Кровля ММП понижается и находится в интервале глубины от 3,0 до 7,9 м в зависимости от режима УГВ: минимальная — при УГВ на глубине 1,5–2,0 м; максимальная — на глубине 0,3–0,5 м. Последнее можно объяснить увеличением положительной части годового теплооборота, что связано с большим значением коэффициента теплопроводности водонасыщенного грунта (по сравнению с воздушносухим) и большим значением объемной теплоты фазового перехода льда при оттаивании льдистого песка (табл. 3). Максимальная глубина понижения кровли ММП в разрезе Пб (рис. 1), возможно, связана с наличием песчаных отложений, залегающих на глубине 6,0 м.

Значения максимальной и минимальной температуры грунтов на глубине 10 м для сливающегося типа ММП на стадии изысканий при всех вариантах УГВ представлены в табл. 6, которая составлена с учетом типа инженерно-геокриологического разреза по значению высоты насыпи, температуры ММП на стадии изыскания и высоты снежного покрова во время эксплуатации.

Максимальная разница температуры грунтового разреза типа Пб для отсыпки в 1,0 м достигает $0,5-0,6^{\circ}\text{C}$, для отсыпки в 2,0 м — $0,7-0,8^{\circ}\text{C}$, причем при любой температуре ММП в начальный период и высоте снега 0,50 м. Для высоты снега 0,75 м и для всех

вариантов минимальные и максимальные значения равны и составляют $-0,2^{\circ}\text{C}$.

Выводы. 1. Высокое положение УГВ в сезонном слое влияет на увеличение годового теплооборота в грунтах, что сказывается на повышении их среднегодовой температуры и увеличении глубины сезонного оттаивания.

2. Высота снежного покрова в 0,75 м препятствует охлаждению грунтов при всех вариантах уровня надмерзлотных вод. Температура грунта на глубине 10 м при подобной высоте снега стремится к $-0,2^{\circ}\text{C}$, вне зависимости от высоты насыпи и типа грунтовой толщи, рассматриваемых в модели.

3. Наличие грунтовых вод в СТС/СМС при высоте снега 0,75 м для всех типов разрезов и при высоте 0,5 м для разрезов типов Па и Пб способствует погружению кровли ММП.

4. Разница температуры грунтов на глубине 10 м на 30-й год создания насыпи высотой 1,0 м в зависимости от положения надмерзлотных вод в летний и зимний периоды достигает $0,7^{\circ}\text{C}$ для инженерно-геокриологического разреза типа Иб и $0,5-0,6^{\circ}\text{C}$ для инженерно-геокриологического разреза типа Пб. Для высоты насыпи 2,0 м разница достигает $0,8-0,9^{\circ}\text{C}$ для разреза типа Иб и $0,7-0,8^{\circ}\text{C}$ для разреза типа Пб.

5. Наиболее благоприятны для понижения температуры грунтов в основании сухие насыпи в летний и зимний периоды.

Таблица 6

Максимальные и минимальные значения температуры грунта ($^{\circ}\text{C}$) на глубине 10 м на 30-й год существования отсыпки для всех вариантов положения уровня надмерзлотных вод

Тип грунтового разреза	Высота насыпи, м	Температура мерзлых грунтов, $^{\circ}\text{C}$	Высота снега, 0,50 м			Высота снега, 0,75 м		
			начальная температура			начальная температура		
			-0,5	-1,0	-1,5	-0,5	-1,0	-1,5
Иб	1,0	минимальная	-1,9	-1,9	-1,9	-0,9	-0,9	-1,0
		максимальная	-1,2	-1,2	-1,3	-0,2	-0,2	-0,3
	2,0	минимальная	-2,3	-2,3	-2,3	-0,2	-0,2	-0,2
		максимальная	-1,4	-1,4	-1,5	-0,2	-0,2	-0,2
Пб	1,0	минимальная	-0,7	-0,8	-0,8	-0,2	-0,2	-0,2
		максимальная	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2
	2,0	минимальная	-0,9	-1,0	-1,0	-0,2	-0,2	-0,2
		максимальная	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Выполнение мерзлотных инженерно-геологических и геофизических изысканий, составление прогноза влияния техногенных нагрузок на состояние геологической среды по площадкам УКПГ-1В и УКПГ-2В Заполярного ГНКМ и зона влияния. В 4-х кн. М.: ФГУП Фундаментпроект, 2007.

Инженерная геокриология / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1991. 438 с.

Методика мерзлотной съемки / Под ред. В.А. Кудрявцева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. 358 с.

Результаты мониторинга земляного полотна участка Хралов–Сохонто на строительстве новой железнодорожной линии Обская — Бованенково // Актуальные проблемы механики, прочности и теплопроводности при низких температурах. Теория и методы замораживания грунтов: Мат-лы XII конф. СПб.: СПбГУНИПТ, 2010. с. 84.

Поступила в редакцию
08.10.2013