

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-623985>

Оригинальное исследование

# Экспериментальная оценка прочностных характеристик техногенных грунтов в заданном районе добычи полезных ископаемых для обоснования типа двигателя трактора

А.Ю. Захаров<sup>1</sup>, Н.С. Вольская<sup>1</sup>, М.М. Журкин<sup>1</sup>, И.А. Ильичев<sup>1, 2</sup><sup>1</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация;<sup>2</sup> Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** При добыче полезных ископаемых существует необходимость разработки тракторов, как специальных транспортных роботизированных средств в составе добывающего роботизированного комплекса, которые способны эффективно перемещаться и работать на грунтах с низкой несущей способностью, на обводнённых территориях и в подводном положении. Предварительная оценка прочностных характеристик такой неоднородной поверхности района эксплуатации позволяет выбрать эффективную концепцию и технические характеристики двигателя трактора. **Цель работы** — формирование базы данных по физическому состоянию и механическим свойствам среды, в которой будет перемещаться и работать трактор.

**Методы.** Для осуществления поставленной цели проведены предварительные эксперименты на местности. Были выделены характерные типы грунтовых площадок и обводнённых территорий, в том числе и техногенного происхождения, заданного района добычи ископаемых. Проведены натурные инструментальные испытания по определению: гранулометрического состава грунтов; физико-механических параметров этих грунтов на выбранных площадках с помощью разработанных оригинальных типов пенетromетра и сдвиговой установки.

**Результаты.** Представлена в графическом виде база численных значений измеренных прочностных характеристик одного из типов грунтов (в качестве примера), как возможной опорной поверхности при перемещениях транспортного средства в районе эксплуатации добывающего роботизированного комплекса. Основой такой базы данных являются графики по результатам экспериментов на свободную осадку и сдвиг с помощью штампов двух видов конфигурации (круглый и оригинальный трак гусеничной цепи соответственно); проведена оценка гранулометрического состава выделенных грунтов.

**Заключение.** По приведённым в исследовании материалам испытаний разработана методика предварительной оценки состояния грунта по двум показателям прочности грунта (глубина колеи  $z$  в зависимости от среднего давления под штампом) и сдвигу (средние касательные напряжения  $\tau$  в пятне контакта по перемещению штампа относительно грунта, зависящие от соотношения усилий от вертикальной нагрузки к тяговому в плоскости контакта). Разработана 3D модель прибрежной и донной области техногенной зоны по добыче полезных ископаемых. Выбраны варианты конструкции высокоэффективных типов двигателей тракторов на основании прогнозирования максимально допустимых напряжений в пятне их контакта с грунтом для участков опорной поверхности рассматриваемого района эксплуатации.

**Ключевые слова:** эксперимент; прогнозирование прочности грунта; штамп; пенетрация; сдвиг; двигатель; трактор.

## Как цитировать:

Захаров А.Ю., Вольская Н.С., Журкин М.М., Ильичёв И.А. Экспериментальная оценка прочностных характеристик техногенных грунтов в заданном районе добычи полезных ископаемых для обоснования типа двигателя трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 3. С. 303–316. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-623985>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-623985>

Original Study Article

# Experimental assessment of strength characteristics of anthropogenic soils in a given mining area for justification of tractor propulsion type

Alexander Yu. Zakharov<sup>1</sup>, Natalia S. Volskaya<sup>1</sup>, Mikhail M. Zhurkin<sup>1</sup>, Ilya A. Ilyichev<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> Naberezhnye Chelny Branch of the Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny, Russian Federation

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** In mining, there is a need to develop tractors as special robotic vehicles of the robotic mining facility that can efficiently move and work on soils with low bearing capacity, in waterlogged areas and in the underwater position. A preliminary evaluation of the strength characteristics of such a heterogeneous surface of the exploitation area helps to choose an effective concept and technical characteristics of the propulsor of the tractor.

**AIM:** Formation of the database of the physical condition and mechanical properties of the environment in which the tractor will move and operate.

**METHODS:** In order to achieve the aim, preliminary experiments were conducted on the terrain. Typical kinds of soil sites and watered areas, including those of anthropogenic origin, of a given mining area were identified. Full-scale instrumental tests were conducted to determine: granulometric composition of soils; physical and mechanical parameters of these soils at the selected sites using the developed original types of a penetrometer and a shear rig.

**RESULTS:** The database of numerical values of measured strength characteristics of one of the soil types (as an example) as a possible supporting surface for vehicle motion in the area of mining facility operation is presented in a graphical form. The basis of this database is the graphs according to the results of experiments on free settlement and shear with the help of dies of two types of configuration (the round die and the original caterpillar track respectively); the granulometric composition of the selected soils has been evaluated.

**CONCLUSION:** The methodology of preliminary assessment of the soil condition by two indicators of soil strength (the rut depth  $z$  depending on the average pressure under the die) and shear (average tangential stresses  $\tau$  in the contact patch on the motion of the die relative to the soil, depending on the ratio of the normal force and the traction force in the contact plane) has been developed. The 3D model of the coastal and bottom area of the technogenic mining zone has been developed. Design variants of highly efficient types of tractor propulsors are selected on the basis of prediction of maximum allowable stresses in the contact patch with the ground for the bearing surface areas of the considered area of operation.

**Keywords:** experiment; ground strength prediction; die; penetration; shear; propulsion; tractor.

## To cite this article:

Zakharov AYu, Volskaya NS, Zhurkin MM, Ilyichev IA. Experimental assessment of strength characteristics of anthropogenic soils in a given mining area for justification of tractor propulsion type. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(3):303–316. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-623985>

Received: 28.11.2023

Accepted: 07.07.2024

Published online: 09.08.2024

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из последствий добычи полезных ископаемых открытым способом является вскрытие водоносных горизонтов и затопление карьера водой. В результате чего образуется техногенное скопление вод и становится невозможной добыча полезных ископаемых традиционными способами. Возникает необходимость в создании роботизированного добывающего комплекса, способного осуществлять добычу полезных ископаемых как открытым, так и подводным методами. С целью формирования исходных данных для разработки такого комплекса проведены исследования по оценке физико-механического состояния грунтов заданного района добычи полезных ископаемых.

Специалистами в области разработки транспортных средств (ТС) признан оптимальным подход в проектировании, основанный на максимальной «приспособленности конструкции и ее параметров» (в первую очередь типа и параметров движителя) к условиям эксплуатации [1–4]. При этом эффективность системы «машина-местность» («робот-местность») должна оцениваться соответствующими измерителями эффективности движения ТС. Рассмотрим итоги исследования заданного района местности с этих позиций.

Задачи проведенных исследований — экспериментальная оценка прочностных характеристик грунтов в заданном районе добычи полезных ископаемых с помощью переносного диагностического комплекса.

Объектом научно-исследовательской работы являются физико-механические свойства грунтов в зоне лагуны, в зоне протекания реки, прибрежной морской зоне и в зоне техногенного скопления вод [3, 5]. В дальнейшем предполагается разработка имитационного виртуального грунтового полигона с возможностью моделирования подводного движения и работы в этих условиях тракторов в составе роботизированного добывающего комплекса [6–9].

В процессе работы проводился анализ гидрометеорологических и гидрографических условий в местах залегания донных полезных ископаемых, оценка прочностных свойств грунтов в зоне предполагаемой добычи полезных ископаемых.

Результатом исследования являются данные по:

- гидрометеорологическим условиям;
- гидрографическим условиям в местах залегания донных полезных ископаемых;
- характеристикам прочностных свойств грунтов в зоне предполагаемой добычи полезных ископаемых.

### Гидрометеорологические и гидрографические условия в местах залегания донных полезных ископаемых

Район испытаний расположен в зоне развития многолетней мерзлоты, мощность которой по данным бурения

составляет 160–300 метров, уровень сезонного (летнего) оттаивания максимально достигает 1–1,5 м.

Район испытаний находится в арктическом климатическом поясе. Зима холодная и продолжительная, лето короткое и прохладное. Среднегодовая температура составляет минус 11°C. Наиболее холодный месяц февраль. Минимальная температура воздуха достигает минус 40–45°C. Среднесуточная температура переходит через 0°C 10 июня и 20 сентября. Обильны снегопады, число дней со снегом 244–248, с метелями — 56–74 (с декабря по март они могут продолжаться 10–15 дней подряд). Снежный покров залегает с октября по июнь. Средняя скорость ветра 8–15 м/с, максимальная 35–40 м/с.

Наиболее характерными элементами являются холмисто-увалистый рельеф и мелкогорье. Абсолютные отметки не превышают 300–400 м при среднестатистической высоте порядка 100–200 м.

Протяжённость низменности, в пределах которой расположено месторождение, колеблется от 2–5 км до 8–20 км. Поверхность низменности слабо наклонена к морю, абсолютные отметки в верхней части не превышают 10–16 м, понижаясь постепенно к побережью. Поверхность низменности заболочена, прорезана многочисленными руслами рек и ручьёв.

В районе испытаний залегают почвы: подбуры тундровые и каменные многоугольники, торфянисто- и торфяно-глеевые болотные, тундровые глеевые торфянистые и торфяные.

Испытаниям подвергался грунт в зоне лагуны реки при впадении в море, а также температура и скорость течения воды в различных точках измерений в устье реки.

Пример разреза прибрежной зоны реки представлен на рис. 1.

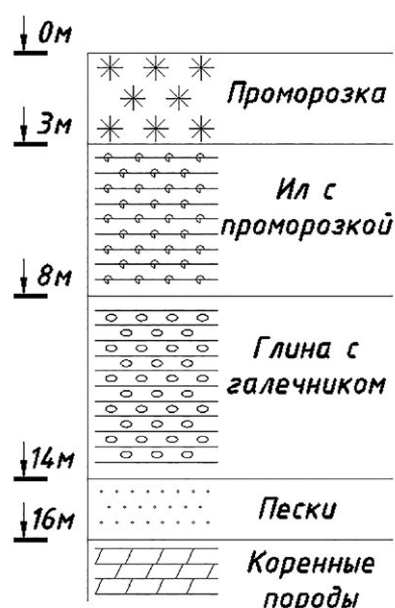


Рис. 1. Разрез прибрежной зоны реки.

Fig. 1. A section of the coastal area of the river.

В ходе испытаний были осуществлены промеры глубин для выявления рельефа дна при помощи эхолота с функцией построения карты местности. Примеры полученных снимков с указанием глубин места техногенного скопления вод, представлены на рис. 2.

Глубина места техногенного скопления вод варьируется от 4,5 метров в средней части до 13 метров в северных и южных краях водоёма. Присутствуют ямы глубиной до 28 метров.

По данным, полученным в результате эксперимента, с помощью географической карты и с учетом особенностей рельефа местности была построена твердотельная модель характерного участка места техногенного скопления вод, визуализация которой представлена на рис. 3.

Аналогично была определена глубина лагуны и устья реки, в той части где представляется возможным провести исследование с помощью моторной лодки глубина составляет от 1,4 метра до 2,4 метра.

В процессе проведения исследования были определены скорости течения в характерных точках зоны протекания реки и зоны лагуны. Исследование производилось при помощи поплавков, брошенных в воду на пусковом створе с фиксацией времени их прохождения между верхним и нижним створами. Схема разметки створов представлена на рис. 4.

Фотография, сделанная в месте исследования скорости течения, являющимся характерным для зоны лагуны, представлена на рис. 5.

Поверхностная скорость течения рассчитана по формуле:

$$V_{\text{пов}} = \frac{L}{t},$$

где  $L$  — путь, пройденный поплавком;  $t$  — время прохождения этого пути.

На рис. 6 представлена эпюра распределения скоростей течения в зависимости от глубины реки.

Средняя скорость течения определяется по формуле:

$$V_{\text{ср}} = K \cdot V_{\text{пов}},$$

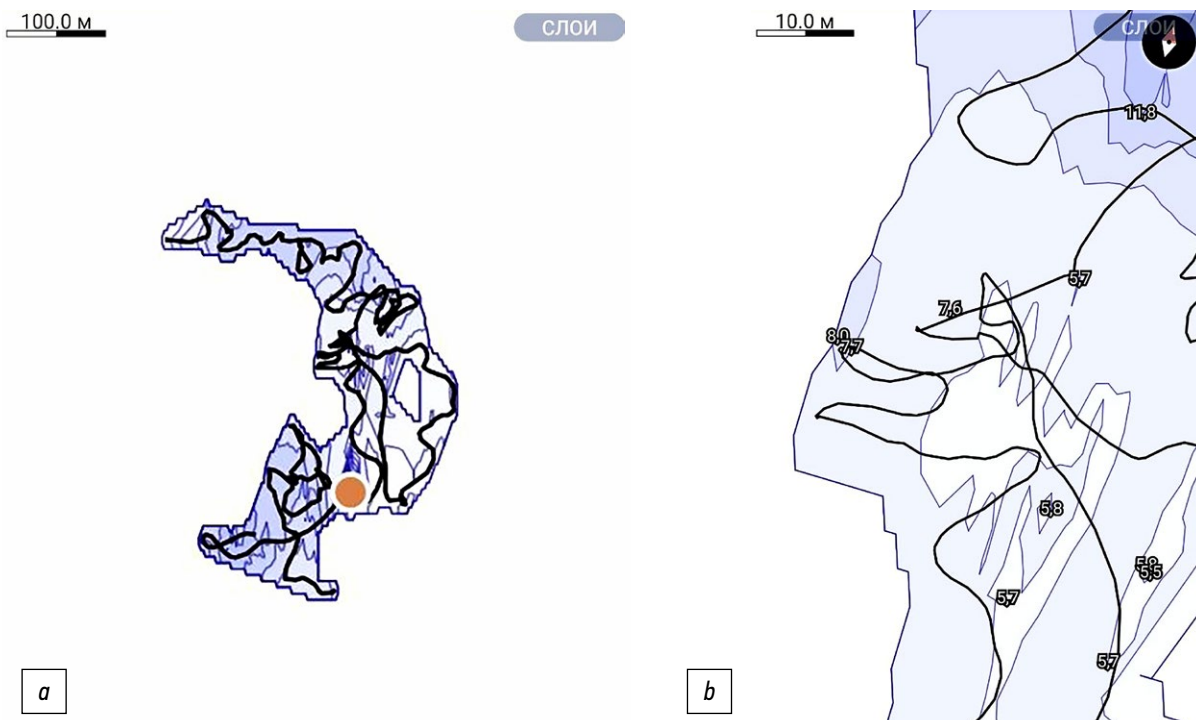
где  $K$  — поправочный коэффициент от поверхностной скорости к средней,  $K = 0,7-0,9$ .

Ввиду небольшой глубины поправочный коэффициент принят равным  $K = 0,9$ .

Пример результатов обработки данных эксперимента, полученных тремя измерениями в точке исследования, находящейся в зоне лагуны, приведён в табл. 1.

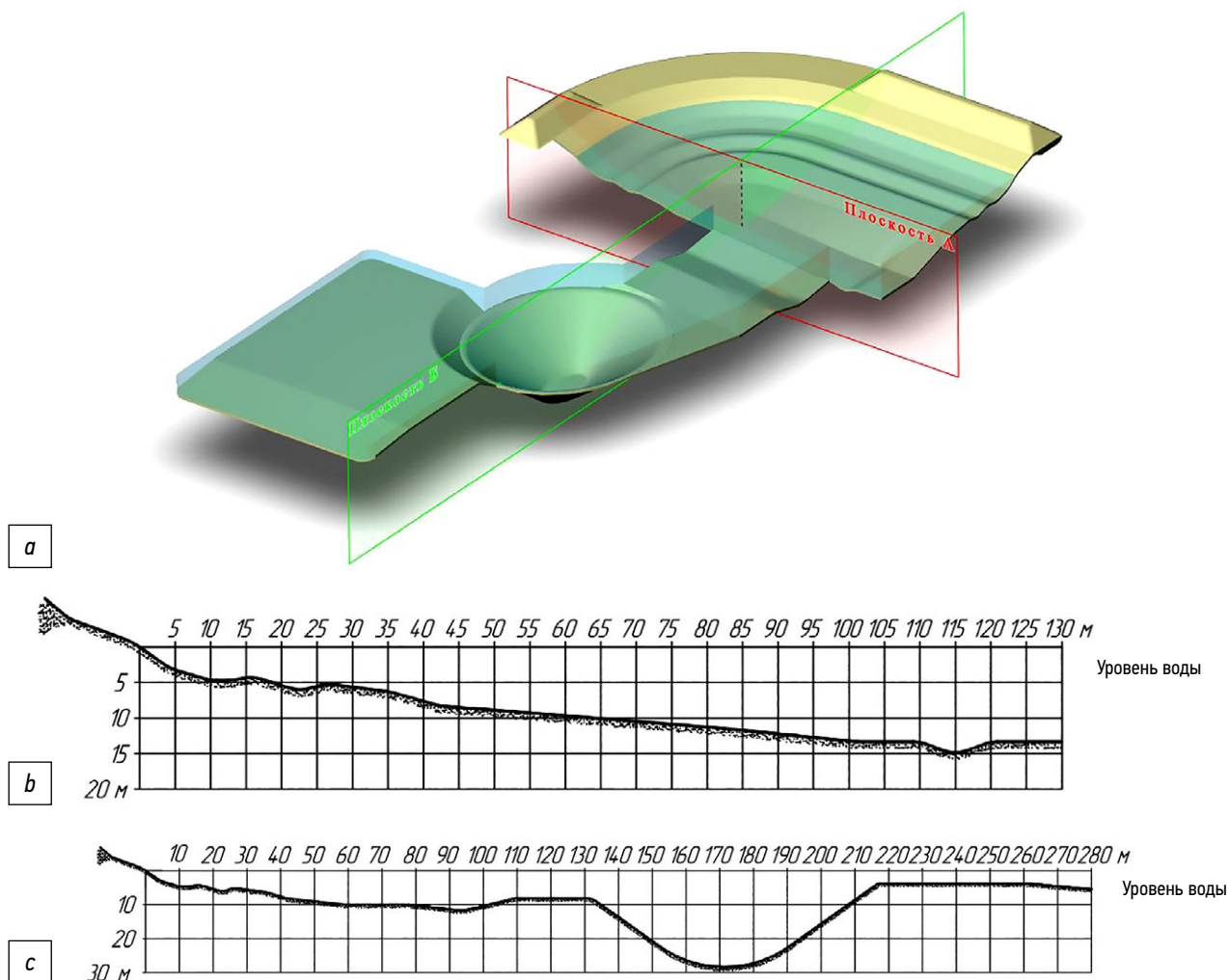
### Методы оценки физико-механического состояния опорных поверхностей заданного района эксплуатации

В местах проведения испытаний на выбранных площадках (с целью предварительной оценки их прочности) были взяты пробы грунта (методики забора проб представлены в [10–12]).

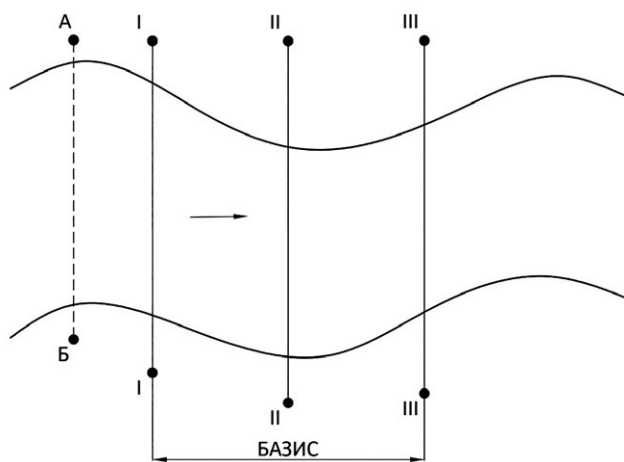


**Рис. 2.** Определение глубины места техногенного скопления вод: а) траектория движения лодки; б) укрупнённый снимок траектории с указанием глубины в метрах.

**Fig. 2.** Determination of the depth of the anthropogenic water accumulation site: a) the boat path; b) enlarged image of the path with depth in meters.



**Рис. 3.** Характерный участок места техногенного скопления вод: а) визуализация твердотельной модели; б) профиль дна в разрезе по плоскости А; в) профиль дна в разрезе по плоскости Б.  
**Fig. 3.** Characteristic site of anthropogenic water accumulation: а) visualization of the solid model; б) the bottom profile in the A plane section; в) the bottom profile in the B plane section.



**Рис. 4.** Схема разметки створов: АБ — пусковой створ, I-I — верхний, II-II — главный, III-III — нижний створы.  
**Fig. 4.** Schematic diagram of the gauging stations: АБ — the launching station, I-I — the upper station, II-II — the main station, III-III — the lower stations.

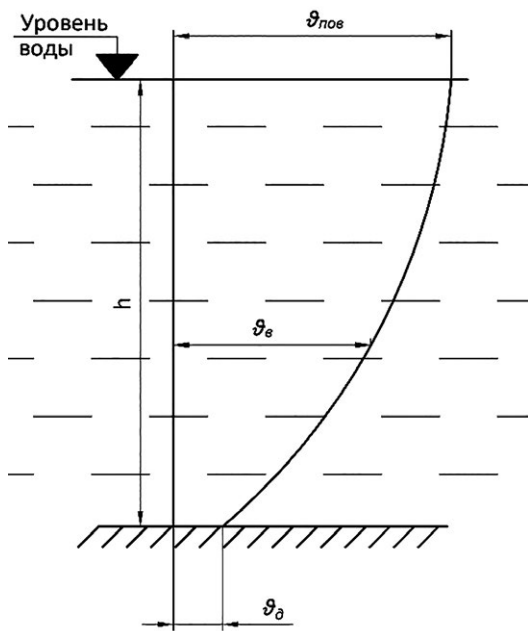


**Рис. 5.** Место исследования скорости течения в зоне лагуны.  
**Fig. 5.** Location of the flow rate study in the lagoon area.

**Таблица 1.** Результаты обработки данных эксперимента в зоне лагуны**Table 1.** Results of processing the data of the experiment in the lagoon area

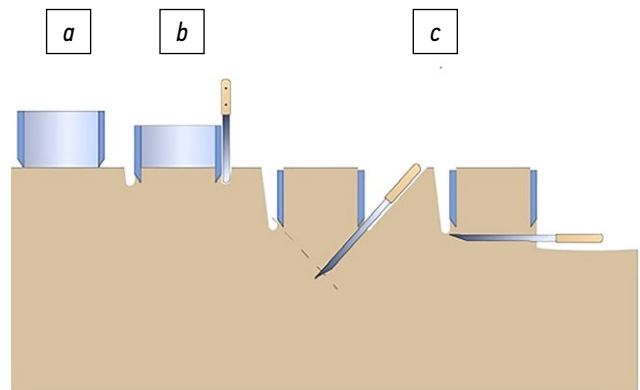
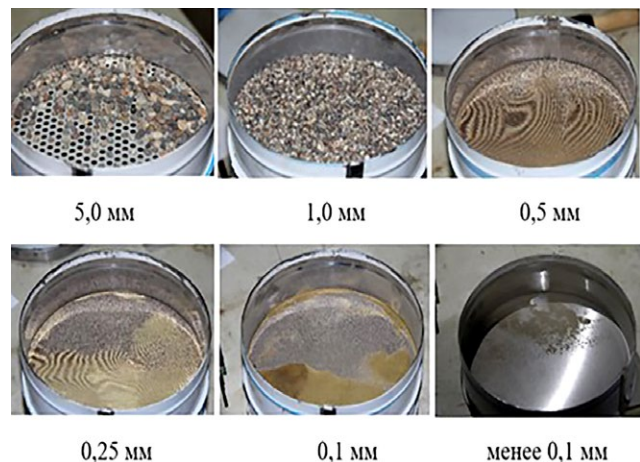
№	Расстояние, м	Время, с	Скорость, м/с	Средняя скорость, м/с
1	35	57	0,61	0,55
2	35	51	0,68	0,61
3	35	39	0,89	0,80

Для проведения гранулометрического анализа и определения влажности грунта пробы отбирались с помощью режущего кольца. Схема взятия пробы представлена на рис. 7.

**Рис. 6.** Эпюра распределения скоростей течения в зависимости от глубины реки.**Fig. 6.** Flow rate distribution as a function of the river depth.

Фотография, сделанная на месте проведения исследования и поясняющая принцип взятия пробы грунта под водой, представлена на рис. 8.

1. По взятым пробам были определены: влажность методом высушивания грунта до постоянной массы и гранулометрический состав ситовым методом. На рис. 9 представлены этапы процедуры определения гранулометрического состава.

**Рис. 7.** Схема взятия пробы грунта методом режущего кольца: а) — позиционирование пробоотборника; б) — внедрение пробоотборника в грунт; в) — извлечение пробоотборника из грунта.**Fig. 7.** Schematic diagram of soil sampling using the cutting ring method: a) — positioning of the sampler; b) — insertion of the sampler into the soil; c) — removal of the sampler from the soil.**Рис. 8.** Взятие пробы грунта под водой.**Fig. 8.** Taking a soil sample underwater.**Рис. 9.** Сита с отсеянным по фракциям грунтом (указан размер ячейки).**Fig. 9.** Sieves with fractionally screened soil (cell size is indicated).

Пример результатов определения влажности методом высушивания проб грунта до постоянной массы и плотности проб грунта, взятых в двух точках в зоне протекания реки, приведён в табл. 2.

Пример результатов определения гранулометрического состава проб грунта, взятых в двух точках в зоне протекания реки, представлен в табл. 3.

По полученным данным была построена кумулятивная кривая гранулометрического состава грунта. Для пробы № 1 и № 2, в соответствии с табл. 3, она представлена на рис. 10 и 11 соответственно.

2. Прочностные (механические) характеристики грунта определялись с помощью двух измерителей:

- прогнозирования глубины колеи  $z$  под штампами разных диаметров (процесс пенетрации или свободной осадки с помощью штампов различной площади);

- сдвиг штампа, равновеликого площади трака гусеничной цепи трактора.

На рис. 12 представлены рабочие моменты проведения экспериментов на грунтовых площадках типа: «техногенный ил», песок с илом на суше и под водой (типы грунтов определены по внешним признакам).

Для проведения грунтовых экспериментов разработан мобильный измерительный комплекс, в табл. 4 представлена его техническая характеристика.

По результатам проведённых экспериментов можно провести предварительный анализ взаимовлияния типа грунта (опорной поверхности в районе эксплуатации робота — на суше и под водой) с контактирующей поверхностью выбираемой конструкции движителя трактора. Предварительные расчеты (в графической форме), прогнозирующие возможные поля численных значений измерителей процессов в пятне контакта движителя с грунтом

**Таблица 2.** Результаты обработки данных эксперимента по определению плотности и влажности грунтов в зоне протекания реки

**Table 2.** Results of processing the data of the experiment of defining density and moisture of the soils in the river flow area

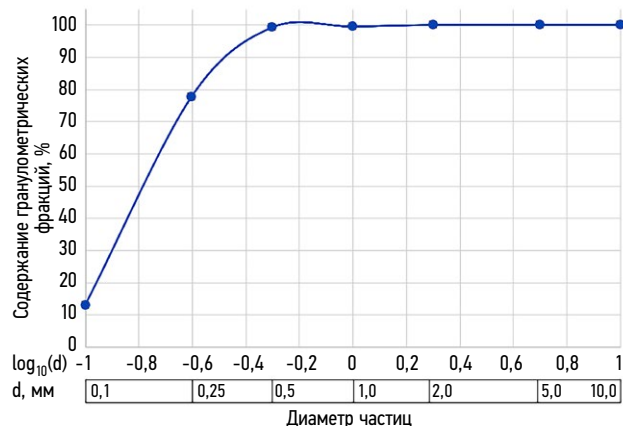
№	Глубина, м	Масса до сушки, г	Масса после сушки, г	Плотность до сушки, г/см <sup>3</sup>	Плотность после сушки, г/см <sup>3</sup>	Влажность, %
1	Грунт с водой V=150 см <sup>3</sup>					
	0,1	574	410	3,83	2,73	40
2	ПГС* с берега реки					
	–	3725	3503	–	–	6,3

\*ПГС — песчано-гравийная смесь, определено по внешним признакам

**Таблица 3.** Результаты обработки данных по гранулометрическому составу проб грунта

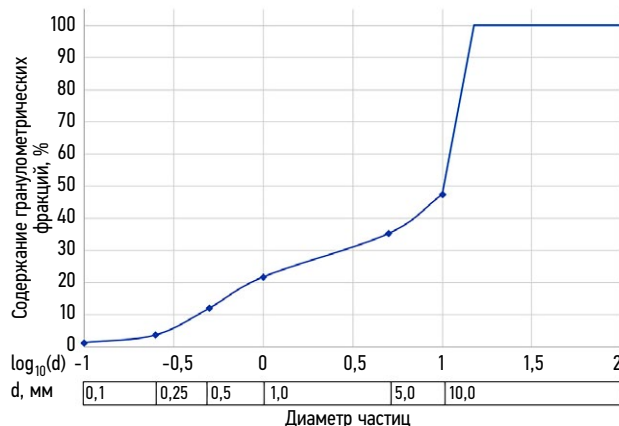
**Table 3.** Results of processing the data of granulometric composition of the soil samples

№	Размер фракции	Масса без промывки водой, г	Содержание в грунте каждой фракции, %
1	Грунт с водой. Масса до сушки 574 г. Масса после сушки 410 г		
	Фракции размером более 10 мм	–	–
	Фракции размером 10–5 мм	–	–
	Фракции размером 5–2 мм	–	–
	Фракции размером 2–1 мм	2	0,49
	Фракции размером 1–0,5 мм	1	0,25
	Фракции размером 0,5–0,25 мм	87	21,43
	Фракции размером 0,25–0,1 мм	263	64,78
2	ПГС с берега реки. Масса до сушки 3725 г. Масса после сушки 3503 г		
	Фракции размером более 10 мм	1845	52,59
	Фракции размером 10–5 мм	428	12,20
	Фракции размером 5–1 мм	471	13,43
	Фракции размером 1–0,5 мм	339	9,66
	Фракции размером 0,5–0,25 мм	294	8,38
	Фракции размером 0,25–0,1 мм	83	2,37
	Фракции размером менее 0,1 мм	48	1,37



**Рис. 10.** Кумулятивная кривая гранулометрического состава пробы грунта № 1.

**Fig. 10.** Cumulative curve of granulometric composition of the soil sample № 1.



**Рис. 11.** Кумулятивная кривая гранулометрического состава пробы грунта № 2.

**Fig. 11.** Cumulative curve of granulometric composition of the soil sample № 2.

при оценке опорно-тяговой проходимости ТС (в данном случае трактора) представлены в качестве примера на рис. 13.

На рис. 13,а представлены результаты расчётов по грунтовому эксперименту процесса «свободная осадка грунта». При ручной пенетрации были использованы круглые штампы пяти диаметров. При совмещении графиков можно сделать ожидаемый вывод, что предпочтительным размером круглого штампа, имитирующего пятно контакта движителя с грунтом является штамп большей площади. Выбор максимального значения диаметра штампа ограничен реальными возможными усилиями непосредственно рук человека (в процессе проведения эксперимента). По приведённому графику

можно отметить, что характер зафиксированного процесса осадки грунта адекватен ранее проводимым аналогичным известным экспериментам на связных грунтах, например [5].

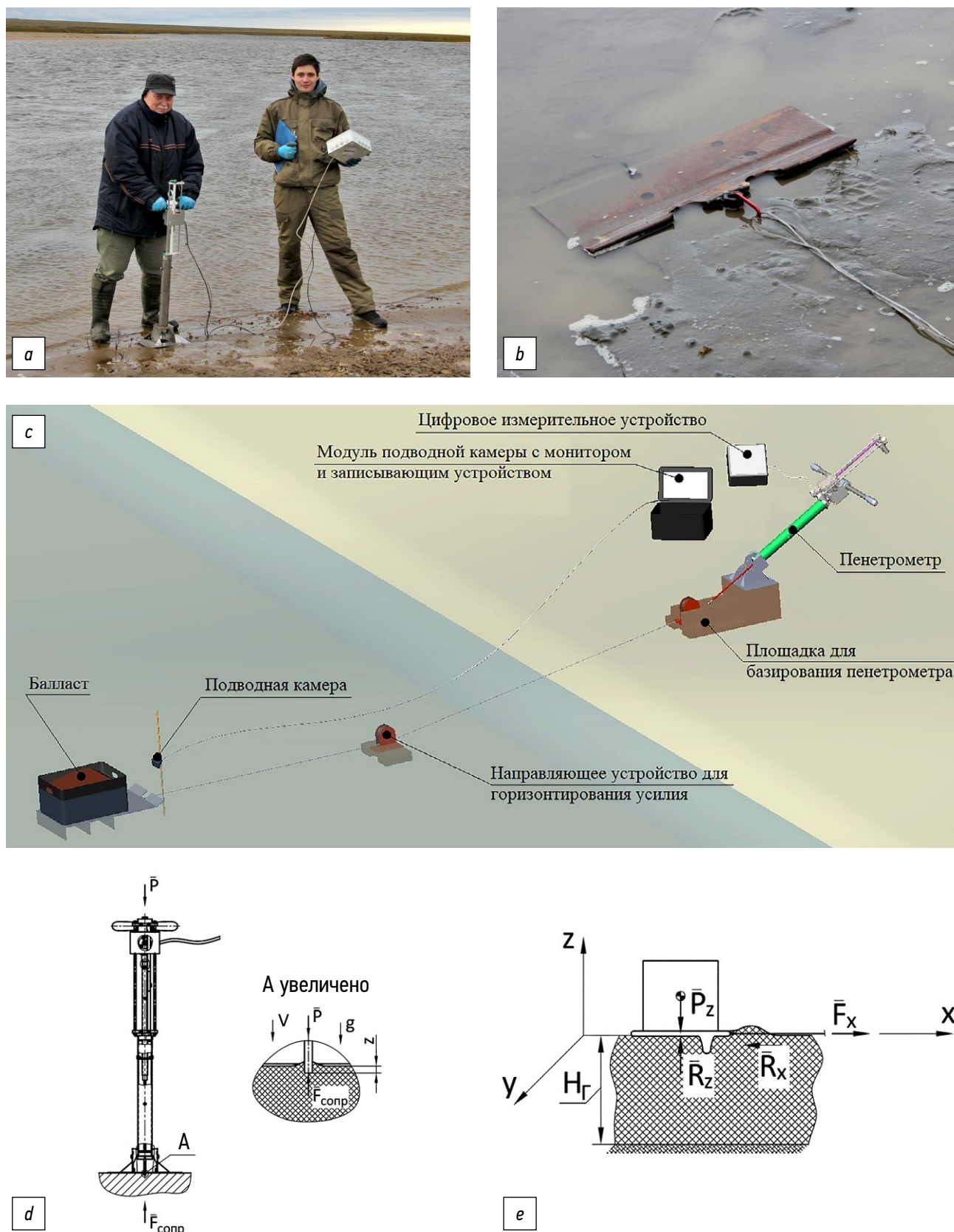
На рис. 13,б и 13,с представлены результаты по грунтовому эксперименту процесса «сдвиг на грунте». В качестве штампа был использован трак гусеничной цепи. Эксперименты проводились при трех значениях вертикальной нагрузки на штамп для грунта типа «техногенный ил». В технической литературе данных по прочности такого грунта нет. По проведённым и обработанным результатам испытаний можно записать известное уравнение Кулона  $\tau = \text{tg } \varphi_0 \cdot \sigma + c_0$  [5], связывающее касательные  $\tau$  и нормальные напряжения  $\sigma$  в грунте с углом внутреннего

**Таблица 4.** Техническая характеристика измерительного комплекса

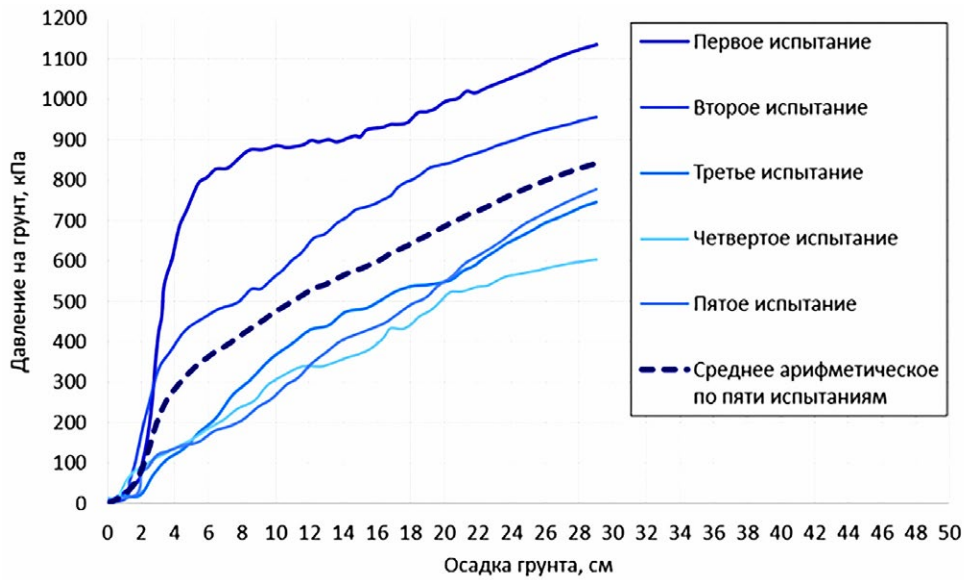
**Table 4.** Technical data of the measuring facility

№	Параметр	Значение
1	Диапазон измерения усилия пенетрации/сдвига, Н	0–1000
2	Пределы допускаемой относительной погрешности измерения силы, %	± 0,5
3	Диапазон измерения перемещения штампа, см	0–29
4	Пределы допускаемой относительной погрешности измерения перемещения штампа, %	± 1,5
5	Площадь штампа в виде трака гусеничной цепи, м <sup>2</sup>	0,1
6	Масса штампа в виде трака гусеничной цепи, кг	16
7	Площадь круглого штампа диаметром 8 мм, м <sup>2</sup>	5·10 <sup>-5</sup>
8	Площадь круглого штампа диаметром 12 мм, м <sup>2</sup>	11·10 <sup>-5</sup>
9	Площадь круглого штампа диаметром 16 мм, м <sup>2</sup>	20·10 <sup>-5</sup>
10	Площадь круглого штампа диаметром 20 мм, м <sup>2</sup>	31·10 <sup>-5</sup>
11	Площадь круглого штампа диаметром 24 мм, м <sup>2</sup>	45·10 <sup>-5</sup>
12	Напряжение питания, В	5
13	Габаритные размеры, м	1,8×0,3×1,5
14	Масса, кг, не более	65

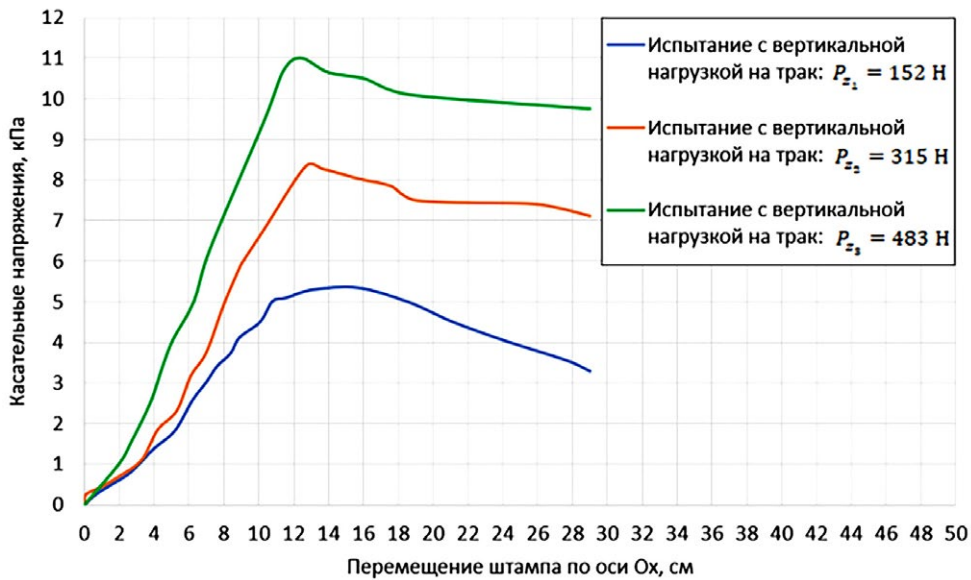




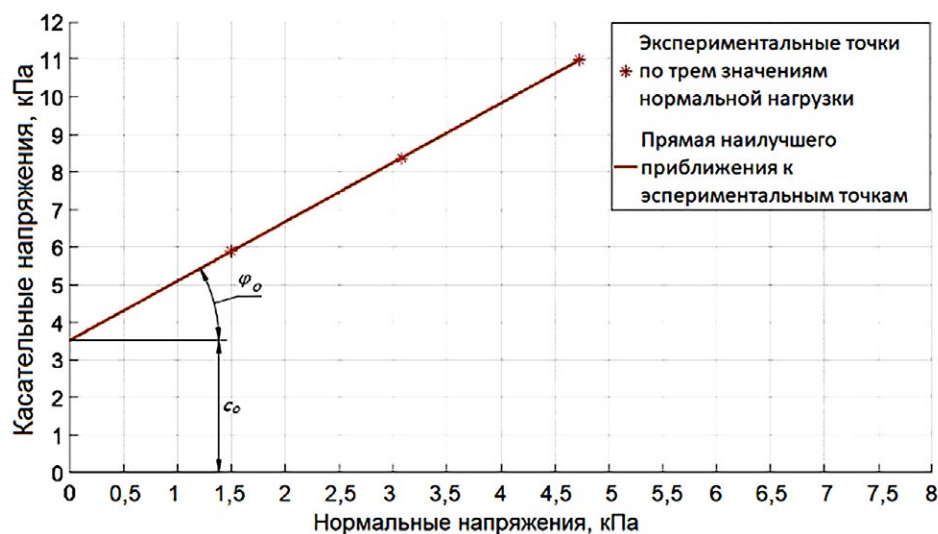
**Рис. 12.** Определение прочностных характеристик грунта: *a)* пример пенетрации (свободной осадки) грунта; *b)* сдвиг штампа в виде трака гусеничной цепи на «техногенном илу»; *c)* измерительный комплекс для проведения грунтовых экспериментов; *d), e)* расчётные схемы к процессам пенетрации и сдвига грунта.  
**Fig. 12.** Determination of the soil strength characteristics: *a)* an example of soil penetration (free settlement); *b)* shear of a die in the shape of a caterpillar chain track at the “anthropogenic silt”; *c)* the measuring facility for conducting soil experiments; *d), e)* calculation schemes to the processes of soil penetration and soil shear.



a



b



c

**Рис. 13.** Пример прогнозирования расчётных значений измерителей процессов в пятне контакта движителя с грунтом «техногенный ил»: а) в процессе «осадки грунта»; б), в) в процессе «сдвига грунта».

**Fig. 13.** An example of predicting the calculated values of process gauges in the contact patch of the propulsor with the “anthropogenic silt” soil: a) during the process of soil settlement; b), c) during the process of soil shear.

трения  $\varphi_0$  и коэффициентом внутреннего сцепления  $c_0$ , в виде:

$$\tau = 1,6 \cdot \sigma + 3,5 \text{ кПа}$$

Таким образом, разработанные метод грунтовых испытаний и комплекс измерительной аппаратуры позволили оценить за небольшой промежуток времени реальные прочностные характеристики опорных поверхностей рассматриваемого района эксплуатации ТС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведённые в исследовании материалы испытаний могут составить основу методики предварительной оценки местности (или опорной поверхности) района предполагаемой эксплуатации ТС (трактора).

Основными этапами такой методики можно считать:

1. выбор местоположения рассматриваемого района с помощью географических и почвенных карт (такой этап в этом исследовании не рассматривался);
2. оценка климатических условий с выделением характерных временных интервалов эксплуатации разрабатываемого или уже существующего ТС (в этом исследовании рассматривался случай обеспечения возможности эксплуатации ТС в летний период времени при температуре воздуха выше нуля);
3. выделение на местности характерных участков поверхности, в том числе и обводнённых поверхностей, где должно быть обеспечено эффективное движение с возможностью производственной деятельности;
4. проведение предварительных оценочных испытаний с выявлением постоянства или вариативности влажности грунтовых поверхностей и их неровности;
5. уточнение гранулометрического состава грунтов выбранных характерных участков (современные ПО позволяют имитировать физические законы, происходящие в грунтах и взаимодействие с активным движителем ТС);
6. физическая имитация взаимодействия элементов движителя с рассматриваемым оригинальным типом грунта по двум физическим процессам: свободная осадка грунта (рис. 12 d)) и сдвиг (рис. 12 e));
7. обработка результатов экспериментов с учетом материальных и временных возможностей персонала экспедиции.

На рис. 14 представлен примерный перечень для выбора возможных вариантов движителей машин (тракторов). Поэтому необходимо при проведении предварительных испытаний иметь подготовленные к этапу «сдвиг на грунте» штампы соответствующей конфигурации.

Исходя из результатов предварительной оценки на прочность грунта характерных участков заданной территории логично рассматривать в качестве базовых для трактора в составе добывающего роботизированного комплекса типы движителей: гусеничный или роторно-винтовой.

## ВЫВОДЫ

В исследовании представлены:

1. методика оценки местности с целью разработки виртуального полигона для испытаний трактора, в том числе на обводнённых поверхностях;
2. принцип построения имитационного полигона для выбора траектории перемещения трактора (в том числе по дну техногенного водоёма);
3. концепция проведения грунтовых испытаний с учетом крайней неоднородности типов грунтов и дна водоёмов, в том числе техногенного происхождения, для обеспечения движения трактора.

Разработаны:

1. оригинальный способ проведения грунтовых испытаний по двум схемам согласно теории механики грунтов: «свободная осадка грунта» с помощью штампов различной конфигурации и «сдвиг на грунте»;
2. специальный мобильный комплекс, включающий переносное оборудование для проведения экспериментов с целью определения прочностных характеристик грунтов.

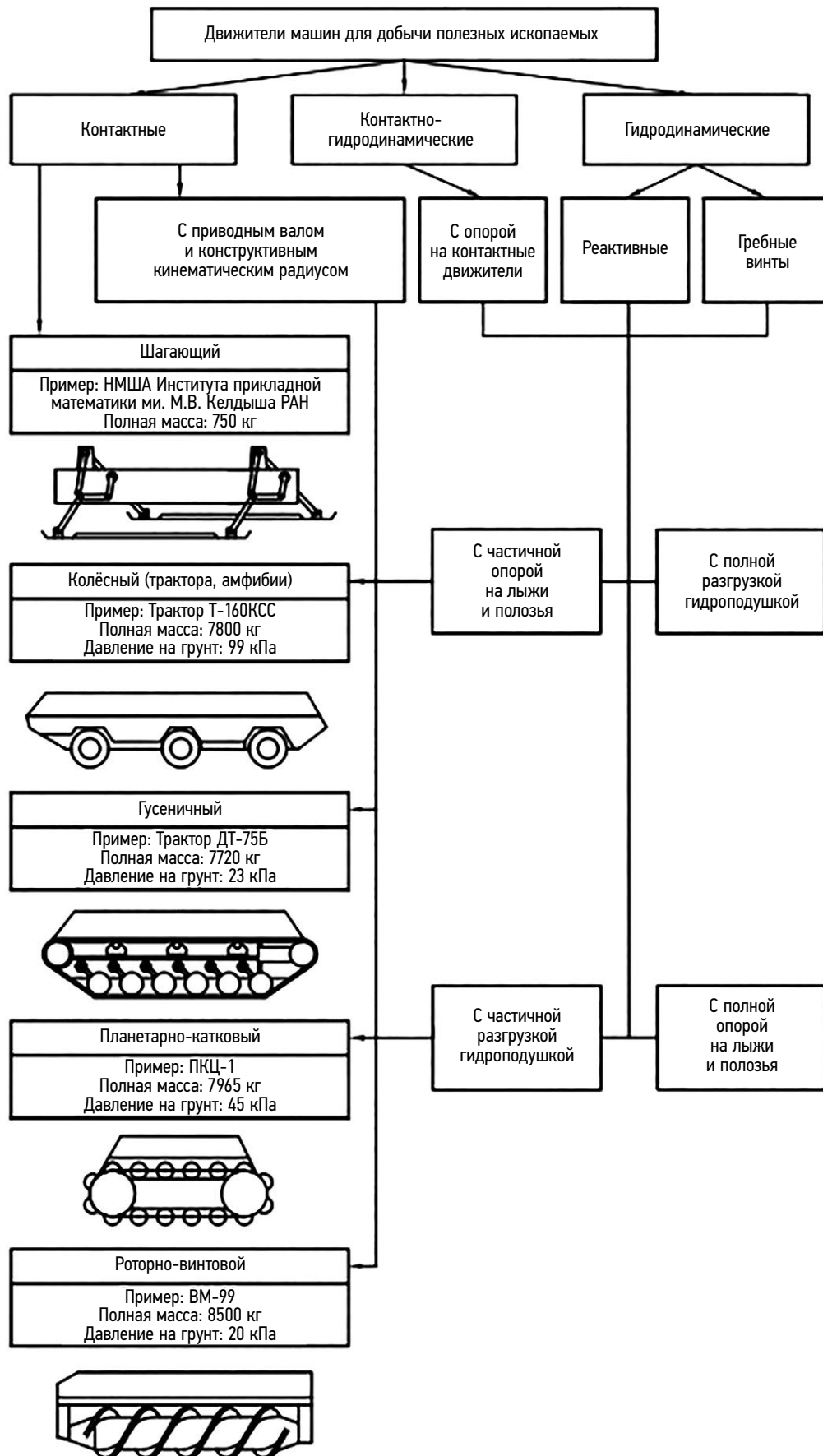
Рассмотрен пример экспериментального определения физико-механических характеристик техногенного грунта ил. Учитывая их значения, можно составить прогноз-оценку показателей опорно-тяговой проходимости транспортных средств с различными типами движителей при движении по ним.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** А.Ю. Захаров — научное руководство, анализ и доработка текста, утверждение финальной версии; Н.С. Вольская — научное руководство, формирование структуры статьи, анализ и доработка текста, утверждение финальной версии; М.М. Журкин — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, подготовка и написание текста статьи; И.А. Ильичёв — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, подготовка и написание текста статьи, создание изображений. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

**Конфликты интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведённым исследованием и публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Исследование и публикация осуществлены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код научной темы, присвоенной учредителем (организацией) ПРИОР/СН/НУ/23/СП6/2).



**Рис. 14.** Варианты двигателей машин для добычи полезных ископаемых.  
**Fig. 14.** Variants of propulsors of mining machines.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** A.Yu. Zakharov — scientific supervision, analysis and revision of the text, approval of the final version; N.S. Volskaya — scientific supervision, formation of the article structure, analysis and revision of the text, approval of the final version; M.M. Zhurkin — literature review, collection and analysis of literature sources, preparation and writing of the article text; I.A. Ilyichev — literature review, collection and analysis of literature sources, preparation and writing of the article text, creation of images.

All authors confirm their authorship compliance with the ICMJE international criteria (all authors made a significant contribution to the conceptualization, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

**Funding source.** The research and publication were supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (scientific topic code assigned by the founder (organization) PRIOR/SN/NU/23/SP6/2).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боженов Ю.А., Борков А.П., Гаврилов В.М., и др. Самоходные необитаемые подводные аппараты. Ленинград: Судостроение, 1986.
2. Куляшов А.П., Колотилин В.Е. Экологичность движителей транспортно-технологических машин. Москва: Машиностроение, 1993.
3. Папунин А.В., Редкозубов А.В., Беляков В.В. О влиянии характерных участков ландшафта местности на подвижность транспортных средств. В кн.: Актуальные вопросы образования и науки сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 11 частях, 30 сентября 2014. Тамбов: Юком, 2014. С. 112–113.
4. Беляков В.В., Куркин А.А., Зезюлин Д.В., Макаров В.С. Шасси робототехнического комплекса мониторинга прибрежной зоны // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. №4(106). С. 353–357.
5. Крамаренко В.В. Грунтоведение. Томск: Томский политехнический университет, 2011.
6. Wasfy T.M., Jayakumar P., Mechergui D., Sanikommu S. Prediction of Vehicle Mobility on Large-Scale Soft-Soil Terrain Maps Using Physics-Based Simulation // International Journal of Vehicle Performance. 2018. Vol. 4 (4). P. 347. doi: 10.1504/IJVP.2018.095753
7. Sane A., Wasfy T.M., Wasfy H.M., Peters J.M. Coupled Multibody Dynamics and Discrete Element Modeling of Bulldozers Cohesive

Soil Moving Operation. In: 11th ASME International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control (MSNDC), 2–5 august 2015. Boston, USA: Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2015. Vol.6. doi: 10.1115/DETC2015-47133

8. Wasfy T.M., Wasfy H.M., Peters J.M. High-Fidelity Multibody Dynamics Vehicle Model Coupled With a Cohesive Soil Discrete Element Model for Predicting Vehicle Mobility. In: 11th ASME International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control (MSNDC), 2–5 august 2015. Boston, USA: Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2015. Vol. 6. doi: 10.1115/DETC2015-47134

9. Standard Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using the Jenike Shear Cell. West Conshohocken: ASTM International, 2007.

10. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Москва: Стандартинформ, 2019.

11. ГОСТ 12071-2014. Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. Москва: Стандартинформ, 2019.

12. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Москва: Стандартинформ, 2019.

## REFERENCES

1. Bozhenov YuA, Borkov AP, Gavrilov VM, et al. *Samokhodnye neobitaemye podvodnye apparaty*. Leningrad: Sudostroenie, 1986. (In Russ).
2. Kulyashov AP, Kolotilin VE. *Ekologichnost' dvizhitelei transportno-tekhnologicheskikh mashin*. Moscow: Mashinostroenie, 1993. (In Russ).
3. Papunin AV, Redkozubov AV, Belyakov VV. O vliyani kharakternykh uchastkov landshafta mestnosti na podvizhnost' transportnykh sredstv. In: *Aktual'nye voprosy obrazovaniya i nauki sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: v 11 chastyakh*, 30 september 2014. Tambov: Yukom; 2014:112–113. (In Russ).
4. Belyakov VV, Kurkin AA, Zezyulin DV, Makarov VS. Chassis of robotic systems for coastal monitoring. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2014;4(106):353–357. (In Russ).
5. Kramarenko VV. *Gruntovedenie: uchebnoe posobie*. Tomsk: Tomskiy politekhnicheskiiy universitet, 2011. (In Russ).
6. Wasfy TM, Jayakumar P, Mechergui D, Sanikommu S. Prediction of Vehicle Mobility on Large-Scale Soft-Soil Terrain Maps Using Physics-Based Simulation. *International Journal of Vehicle Performance*. 2018;4(4):347. doi: 10.1504/IJVP.2018.095753
7. Sane A, Wasfy TM, Wasfy HM, Peters JM. Coupled Multibody Dynamics and Discrete Element Modeling of Bulldozers Cohesive Soil Moving Operation. In: *11th ASME International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control (MSNDC)*, 2–5 august 2015. Boston, USA: Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2015;6. doi: 10.1115/DETC2015-47133
8. Wasfy TM, Wasfy HM, Peters JM. High-Fidelity Multibody Dynamics Vehicle Model Coupled With a Cohesive Soil Discrete Element Model for Predicting Vehicle Mobility. In: *11th ASME International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control (MSNDC)*, 2–5 august 2015. Boston, USA: Proceedings

of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2015;6. doi: 10.1115/DETC2015-47134

9. *Standard Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using the Jenike Shear Cell*. West Conshohocken: ASTM International; 2007.

10. GOST 12536-2014. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo)*

*i mikroagregatnogo sostava*. Moscow: Standartinform, 2019. (In Russ).

11. GOST 12071-2014. *Grunty. Otbor, upakovka, transportirovanie i khranenie obrastsov*. Moscow: Standartinform, 2019. (In Russ).

12. GOST 5180-2015. *Grunty. Metody laboratornogo opredeleniya fizicheskikh kharakteristik*. Moscow: Standartinform, 2019. (In Russ).

## ОБ АВТОРАХ

### \* Ильичёв Илья Александрович,

инженер Центра инженерных разработок «Импортозамещение в машиностроении»; аспирант «Кафедры автомобилей,

автомобильных двигателей и дизайна»;

адрес: Российская Федерация, 105005, Москва,

ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1;

ORCID: 0009-0009-3725-4614;

eLibrary SPIN: 9770-2582;

e-mail: illlyai11999@gmail.com

### Захаров Александр Юрьевич,

канд. техн. наук,

доцент кафедры «Колёсные машины»;

ORCID: 0009-0003-1255-6575;

eLibrary SPIN: 5321-2615;

e-mail: zakharov-al@mail.ru

### Вольская Наталья Станиславовна,

д-р техн. наук,

профессор кафедры «Колёсные машины»;

ORCID: 0000-0003-0655-2677;

eLibrary SPIN: 2339-7112;

e-mail: volskayans@bmstu.ru

### Журкин Михаил Михайлович,

аспирант кафедры «Колёсные машины»;

ORCID: 0009-0006-6254-8954;

e-mail: mimizhur@gmail.com

## AUTHORS' INFO

### \* Ilya A. Ilyichev,

Engineer at the Engineering Development Center "Import Substitution in Mechanical Engineering"; Postgraduate

of the Automobiles, Automobile Engines and Design Department;

address: 5 bldg 1 2nd Baumanskaya street, 105005 Moscow,

Russian Federation;

ORCID: 0009-0009-3725-4614;

eLibrary SPIN: 9770-2582;

e-mail: illlyai11999@gmail.com

### Alexander Yu. Zakharov,

Cand. Sci. (Engineering),

Associate Professor of the Wheeled Machines Department;

ORCID: 0009-0003-1255-6575;

eLibrary SPIN: 5321-2615;

e-mail: zakharov-al@mail.ru

### Natalia S. Volskaya,

Dr. Sci. (Engineering),

Professor of the Wheeled Machines Department;

ORCID: 0000-0003-0655-2677;

eLibrary SPIN: 2339-7112;

e-mail: volskayans@bmstu.ru

### Mikhail M. Zhurkin,

Postgraduate of the Wheeled Machines Department;

ORCID: 0009-0006-6254-8954;

e-mail: mimizhur@gmail.com

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author