

Разработка и исследование метода для разбивки и контроля строительства дорожных закруглений

П.В. Тихомиров^a, В.Э. Меерсон^b, М.В. Решетникова^c,
О.Л. Картавец^d, Д.К. Благодравов^e, А.Б. Бондарев^f

Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр. Революции, 19, Воронеж, Россия

^a mail@bgitu.ru, ^b meerson@yandex.ru, ^c mvr7.3@yandex.ru,

^d meerson@yandex.ru, ^e dblagonravov@yandex.ru, ^f meerson@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-4708-0645>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1146-5316>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-4787-6371>, ^e <https://orcid.org/0000-0003-3247-3411>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-4724-6489>

Статья поступила 24.08.2022, принята 02.09.2022

Авторами рассматривается метод створных нормалей для детальной разбивки и восстановления одновременно оси кривой и нормалей к кривой. Метод заключается в разбивке прямоугольными координатами непосредственно от тангенса восстановительных парных опорных знаков, находящихся за зоной строительных работ и обозначающих створ нормали к кривой в каждой точке ее детальной разбивки. Для сравнительного анализа точности восстановления переходных кривых предлагаемым методом створных нормалей и существующим методом вноса нормали от кривой предлагается исходить из того, что данный метод предусматривает восстановление кривой промерами расстояний b_A от пункта A_i , вынесенного непосредственно от тангенса T , в отличие от существующего метода, где кривая восстанавливается от пункта A_i , вынесенного от промежуточной точки кривой, которая, в свою очередь, разбита от тангенса T . Рассмотрен метод створных нормалей для выноса опорных восстановительных пунктов внутрь кривой путем поворота системы координат на угол α и откладывания ординаты y'_A и y'_B от хорды, соединяющей начало и конец переходной кривой. В статье приведен расчет более высокой точности восстановления кривой предлагаемым методом по сравнению с существующим. Полученные результаты имеют большое практическое значение при строительстве дорожных закруглений.

Ключевые слова: метод выноса нормали от кривой; метод створных нормалей; средняя квадратическая погрешность восстановления кривой; разбивка кривой методом створных нормалей от тангенсов; разбивка кривой методом створных нормалей от хорд.

Development and study of the method for laying out and controlling the construction of road curves

P.V. Tikhomirov^a, V.E. Meerson^b, M.V. Reshetnikova^c,
O.L. Kartavtsev^d, D.K. Blagonravov^e, A.B. Bondarev^f

Voronezh State University of Engineering Technologies; 19, Revolution Ave., Voronezh, Russia

^a mail@bgitu.ru, ^b meerson@yandex.ru, ^c mvr7.3@yandex.ru,

^d meerson@yandex.ru, ^e dblagonravov@yandex.ru, ^f meerson@yandex.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-4708-0645>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1146-5316>,

^d <https://orcid.org/0000-0002-4787-6371>, ^e <https://orcid.org/0000-0003-3247-3411>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-4724-6489>

Received 24.08.2022, accepted 02.09.2022

The article considers the method of leading normals for a detailed layout and restoration of both the axis of the curve and the normals to the curve. The method consists in laying out with rectangular coordinates directly from the tangent of restoration paired reference signs located behind the construction area and marking the normal to the curve at each point of its detailed staking. For a comparative analysis of the accuracy of restoration of transition curves by the proposed method of leading normals and the existing method of introducing a normal from the curve, it is proposed to proceed from the fact that this method provides for the restoration of the curve by measuring the distances b_A from the point A_i , taken directly from the tangent T , in contrast to the existing method, where the curve is restored from the point A_i , taken out from the intermediate point of the curve, which in turn is laid from the tangent T . The article presents a calculation of a higher accuracy of the curve restoration by the proposed method compared to the existing one. The results obtained are of great practical importance in the construction of road curves.

Keywords: method of laying out the normal from the curve; method of line normals; root-mean-square error of curve reconstruction; splitting of the curve by the method of line normals from tangents; splitting of the curve by the method of line normals from chords.

Введение. В настоящее время для целей восстановления неизбежно уничтожаемых разбивочных знаков в процессе строительства механизированными методами дорожных закруглений используют дополнительные закрепления знаков за зоной строительных работ в виде створов, вынесенных от кривой по нормали к ее оси. Таким образом, процесс разбивки и восстановления кривых методов выноса нормали от кривой происходит в следующем порядке:

- ✓ разбивают кривую любым из известных методов, чаще всего методом прямоугольных координат;
- ✓ от знаков детальной разбивки восстанавливают нормаль к кривой — либо теодолитом, устанавливая его над каждой промежуточной точкой кривой и откладывая заранее рассчитанные или определенные по номограмме углы между направлением на НПК и нормалью, либо восстанавливая перпендикуляр по середине хорды между двумя точками, смежными с данной;
- ✓ в створе нормали за зоной строительных работ закрепляют два знака на определенном расстоянии от кривой и друг от друга;
- ✓ пользуясь вынесенными знаками как опорными, откладывая соответствующие расстояния, в процессе строительства восстанавливают ось и линии бровок земляного полотна.

Как видно, опорные выносные знаки для разбивки, восстановления и контроля возведения земляного полотна или дорожного основания и покрытия на кривой, особенно необходимые для разбивки поперечников переходных кривых при устройстве отгона виража, выносят в натуру сложным, в несколько этапов, трудоемким путем с погрешностями каждого этапа разбивки [1; 4]. Кроме того, восстановление нормали к переходной кривой дает погрешность, обусловленную непостоянством кривизны кривой. Для одновременной детальной разбивки оси кривой и нормалей к кривой был ранее предложен метод наклонных координат, или метод нормалей к кривой. Необходимость перестановки теодолита для разбивки каждой промежуточной точки кривой этим методом снижает производительность и надежность разбивки. Кроме того, для целей восстановления оси кривой и нормалей во время строительства метод мало пригоден, так как большинство зафиксированных на линии тангенса разбивочных работ требуют дополнительного выноса и закрепления и, кроме того, не всегда мастер — дорожный строитель имеет под рукой теодолит (рис. 1, 2).

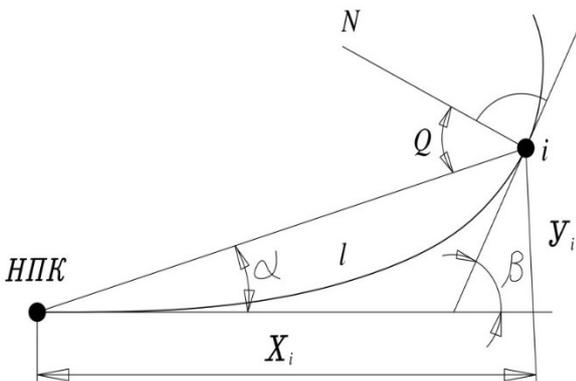


Рис. 1. К определению направления нормали к клотоиде

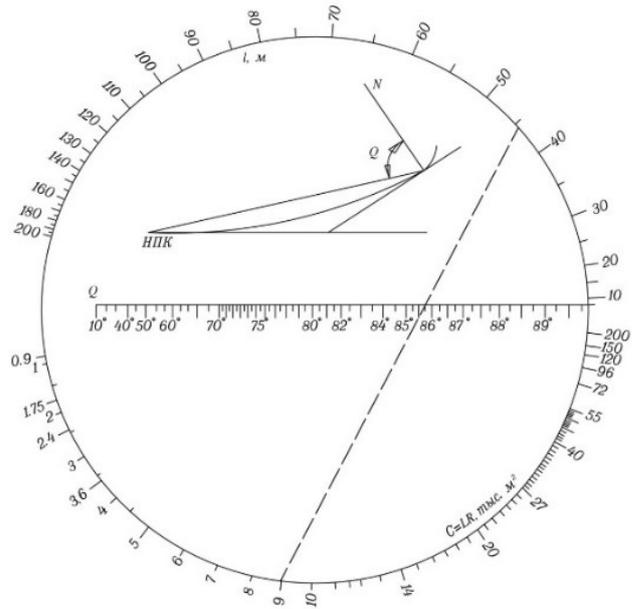


Рис. 2. Номограмма для определения направления нормали к клотоиде

Метод створных нормалей для детальной разбивки и восстановления одновременно оси кривой и нормалей к кривой. Для устранения большинства из указанных выше недостатков авторами предложен метод створных нормалей для детальной разбивки и восстановления одновременно оси кривой и нормалей к кривой. Метод заключается в разбивке прямоугольными координатами непосредственно от тангенса восстановительных парных опорных знаков, находящихся за зоной строительных работ и обозначающих створ нормали к кривой в каждой точке ее детальной разбивки (рис. 2).

В системе декартовых координат с началом в точке НПК и осью абсцисс, совпадающей с линией тангенса Т, абсциссы и ординаты выносных опорных пунктов A_i и B_i рассчитывают по следующим формулам.

В пределах переходных кривых:

$$x_A = b_A \sin \beta_i + X_i \quad (1)$$

$$y_A = b_A \cos \beta_i - Y_i \quad (2)$$

$$x_B = b_B \sin \beta_i + X_i \quad (3)$$

$$y_B = b_B \cos \beta_i - Y_i \quad (4)$$

где $\beta_i = \frac{l^2 i^2}{2c}$ (радиан) (5)

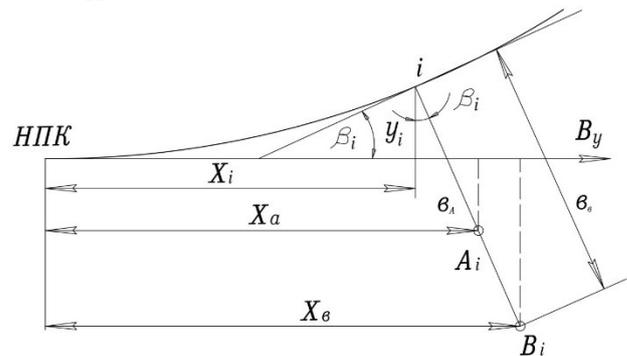


Рис. 3. Разбивка кривой методом створных нормалей от тангенсов

$$X_i = \sqrt{2C \beta_i \left\{ 1 + \sum_{k=1}^{k=\infty} \frac{\beta_i^{2k} (-1)^k}{(2k)!(4k+1)} \right\}} \quad (6)$$

$$Y_i = \sqrt{\frac{\beta_i}{3} + \sum_{k=1}^{k=\infty} \frac{\beta_i^{2k+1} (-1)^k}{(2k+1)!(4k+3)}} \quad (7)$$

В пределах круговых кривых, следующих за переходными:

$$x_{A_k} = b_A \sin \beta_k + X_k \quad (8)$$

$$y_{A_k} = b_A \cos \beta_k - Y_k \quad (9)$$

$$x_{B_k} = b_B \sin \beta_k + X_k \quad (10)$$

$$y_{B_k} = b_B \cos \beta_k - Y_k \quad (11)$$

$$\text{где } \beta_k = \frac{b_i - L/2}{R} \text{ (радиан)} \quad (12)$$

$$\beta_0 = L/2R \text{ (радиан)} \quad (13)$$

$$X_k = X_0 + 2R \sin \frac{b_i - L}{2R} \cos \frac{b_i}{2R} \quad (14)$$

$$Y_k = Y_0 + 2R \sin \frac{b_i - L}{2R} \sin \frac{b_i}{2R} \quad (15)$$

где b_A и b_B — расстояние выноса пунктов A_i и B_i за зону строительных работ по нормали к кривой (наиболее приемлемое значение b_A для большинства категорий дорог — 15 м, это значение и будет приниматься в дальнейших расчетах; величина b_B превышает b_A на 5 м; l — интервал детальной разбивки кривой; i — номер разбивочной доски; L — общая длина клотоиды; R — радиус в конце клотоиды; $C = LR$; β_i или β_k — угол, образованный тангенсом и касательной к переходной или круговой в каждой разбивочной точке.

Для сравнительного анализа точности восстановления переходных кривых предлагаемым методом створных нормалей и существующим методом вноса нормалей от кривой необходимо исходить из того, что предлагаемый метод предусматривает восстановление кривой промерами расстояний b_A от пункта A_i , вынесенного непосредственно от тангенса T , тогда как при существующем методе кривая восстанавливается от пункта A_i , вынесенного от промежуточной точки кривой, которая, в свою очередь, разбита от тангенса T [2; 5].

На точность восстановления кривой методом створных нормалей влияют в основном такие среднеквадратические погрешности:

m_x — откладывания абсциссы;

x_A ; m_y — откладывания ординаты;

u_A ; m_{\perp} — восстановления перпендикуляра призмным ($m_{\perp} = 2$);

$m_{\text{ств}}$ — отыскания створа тангенса T для откладывания ординаты u_A ;

$m_{\text{ф.а.}}$ — фиксация пункта A_i ;

m_b — откладывания расстояния b_A на продолжение створа пунктов A_i и B_i ;

$m_{\text{ф.к.}}$ — фиксация точки на кривой.

Если принять во внимание, что на точность положения точек кривой относительно ее оси влияют только составляющие погрешностей, направленные по нормали к кривой, то средняя квадратическая погрешность восстановления кривой предлагаемым методом створных нормалей m_s определится следующим образом:

$$m_s^2 = m_x^2 \sin^2 \beta_i + \frac{m_{\perp}^2 u_A^2}{\rho^2} \sin^2 \beta_i + m_{\text{ств}}^2 \cos^2 \beta_i + m_y^2 \cos^2 \beta_i + m_{\text{ф.а.}}^2 + m_b^2 + m_{\text{ф.к.}}^2 \quad (16)$$

Так как существующий метод включает дополнительные этапы разбивки — фиксацию точки на кривой и вынос ее за зону строительных работ, то средняя квадратическая погрешность восстановления этим методом включает в себя дополнительные погрешности $m_{\text{ф.к.}}$ и m_b :

$$m_v^2 = m_x^2 \sin^2 \beta_i + \frac{y_i^2 m_{\perp}^2}{\rho^2} \sin^2 \beta_i + m_{\text{ств}}^2 \cos^2 \beta_i + m_y^2 \cos^2 \beta_i + 2m_{\text{ф.а.}}^2 + 2m_b^2 \quad (17)$$

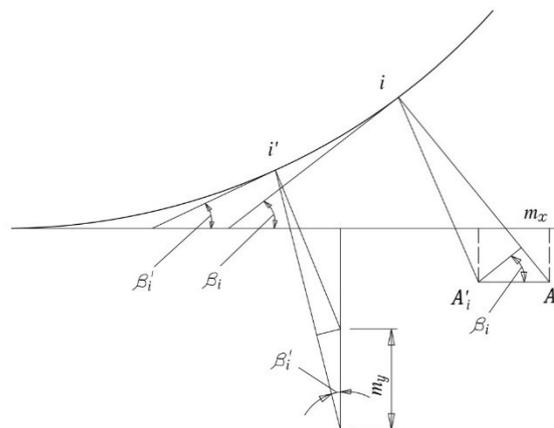


Рис. 4. Погрешность восстановления клотоиды методом створных нормалей

Более высокая точность восстановления кривой предлагаемым методом по сравнению с существующим будет показана доказательством неравенства:

$$m_s^2 < m_v^2 \quad (18)$$

или:

$$m_s < m_v \text{ (2.210) } < \text{ (2.211) } \quad (19)$$

Каждая из погрешностей одного метода практически равна соответствующей погрешности другого метода за исключением погрешностей:

$$\frac{y_A^2 m_{\perp}^2}{\rho^2} \sin^2 \beta_i > \frac{y_i^2 m_{\perp}^2}{\rho^2} \sin^2 \beta_i \quad (20)$$

или:

$$\frac{(y_i - b_A \cos \beta_i)^2 \sin^2 \beta_i m_{\perp}^2}{\rho^2} > \frac{y_i^2 \sin^2 \beta_i m_{\perp}^2}{\rho^2} \quad (21)$$

Это объясняется тем, что величина b_A в большинстве случаев в несколько раз отличается от ординаты y_i . После сокращений перепишем неравенство (21) в виде:

$$\frac{(y_i - b_A \cos \beta_i)^2 \sin^2 \beta_i m_{\perp}^2}{\rho^2} - \frac{y_i^2 \sin^2 \beta_i m_{\perp}^2}{\rho^2} < m_b^2 + m_{\text{ф.к.}}^2 \quad (22)$$

или, после некоторых преобразований:

$$\frac{\sin^2 2\beta_i m_{\perp}^2 b_A^2}{4\rho^2} \left(1 - \frac{2y_i}{b_A \cos \beta_i} \right) < m_b^2 + m_{\text{ф.к.}}^2 \quad (23)$$

Величина в скобках при любых нормативных значениях R и L переходных кривых и при $b_A = 15$ м находится в пределах:

$$0 < \left(1 - \frac{2y_i}{b_A \cos \beta_i} \right) < 1 \quad (24)$$

Рассмотрим неравенство (25) при максимальном значении величины в скобках, равном единице, и при $\beta_i = 15^\circ$, так как в большинстве случаев (т. е. при $R > 80$ м) при нормативных параметрах клотоид β_i не превышает 15° .

Подставляя указанные значения в (24), получим:

$$4,5^2 \text{ мм} < m_b^2 + m_{\text{ф.к.}}^2 \quad (25)$$

Поскольку $m_b > 1,5$ мм и $m_{\text{ф.к.}} > 1,5$ мм, то неравенство (24) имеет смысл, а, следовательно, имеет смысл неравенство (25), т. е. точность восстановления оси кривой предлагаемым методом створных нормалей выше точности восстановления существующим методом, описанным в начале настоящего параграфа.

Метод створных нормалей. Метод створных нормалей также применим для выноса опорных восстановительных пунктов внутрь кривой. Для этого необходимо повернуть систему координат на угол α и откладывать ординаты y'_A и y'_B от хорды, соединяющей начало и конец переходной кривой (рис. 5). В этом случае координаты пунктов A'_i и B'_i рассчитываются по формуле:

$$x'_A = b_A \sin(\alpha - \beta_i) + (Y_i \sin \alpha + X_i \cos \alpha); \quad (26)$$

$$y'_A = b_A \cos(\alpha - \beta_i) + (X_i \sin \alpha - Y_i \cos \alpha); \quad (27)$$

$$x'_B = b_B \sin(\alpha - \beta_i) + (Y_i \sin \alpha + X_i \cos \alpha); \quad (28)$$

$$y'_B = b_B \cos(\alpha - \beta_i) + (X_i \sin \alpha - Y_i \cos \alpha); \quad (29)$$

$$t g \alpha = \frac{L}{6R} + \frac{L^3}{840R^3} + \frac{L^5}{191808R^5} + \quad (30)$$

β_i, X_i, Y_i — см. формулы (8)–(15).

Для автоматизации необходимых данных при разбивке и восстановлении дорожных закруглений методом створных нормалей от тангенсов и хорд соответствующий вычислительный алгоритм реализован в программу, с помощью которой производится расчет на компьютере [8; 9].

Итак, разбивка, восстановление и геодезический контроль строительства дорожных закруглений методом створных нормалей имеет свои преимущества и недостатки. К недостаткам можно отнести то, что тангенсы или хорды должны быть доступны для линейных измерений. Однако при наличии выбора для разбивки тангенса или хорды один из этих элементов в большинстве случаев практики бывает доступным. К недостаткам также можно отнести необходимость закрепления большого количества опорных восстановитель-

ных знаков, однако эти знаки закрепляются один раз до начала земляных работ, не уничтожаются, не требуют восстановления и сохраняются до окончания строительства [6; 7; 10].

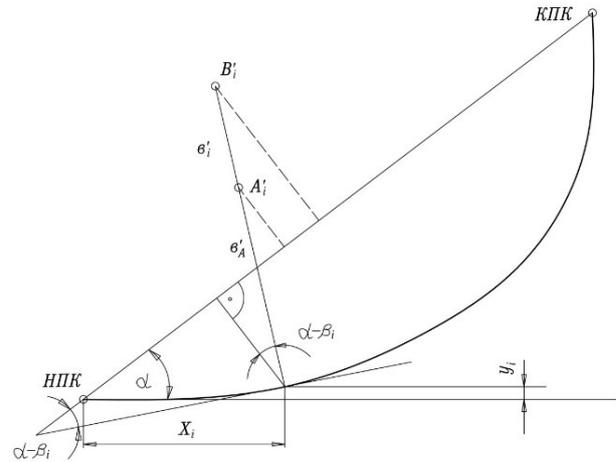


Рис. 5. Разбивка кривой методом створных нормалей от хорд

Заключение. К преимуществам метода створных нормалей по сравнению с методом выноса нормали от кривой относятся:

1. Снижение трудоемкости метода, обусловленное более простой технологией разбивки створных нормалей;
2. Более высокая надежность восстановления кривой, обеспеченная высокой точностью разбивки выносных опорных восстановительных знаков, образующих так называемую дублирующую кривую;
3. Более высокая точность определения направления нормалей к кривой, что особенно важно для разбивки осей искусственных сооружений, а также для разбивки поперечников на переходных кривых при устройстве отгона виража;
4. Удобство и простота разбивки выносных восстановительных пунктов прямоугольными координатами, так как ордината в большинстве случаев не превышает длины мерной ленты — 20 м;
5. Высокая производительность восстановления с помощью рулетки планового положения любой точки нормального поперечного профиля дороги в процессе строительства.

Литература

1. Бурмистров Д.В., Высоцкая И.А., Денисенко В.В., Брюховецкий А.Н., Никитин В.В. Алгоритм моделирования процессов организации и планирования ритмичного строительства лесовозных автомобильных дорог // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: материалы междунар. науч.-практической конф. (24-25 нояб. 2020 г.). Воронеж, 2020. С. 295-298.
2. Могутнов Р.В., Букреев В.Ю., Тихомиров П.В., Слюсарев А.А., Брюховецкий А.Н. Алгоритм формирования технического задания на проектирование машины // Механизация и автоматизация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве: материалы нац. науч.-практической конф. (25 сент. 2020 г.). Воронеж, 2020. С. 52-58.
3. Логойда В.С., Тихомиров П.В., Никитин В.В., Букреев В.Ю., Саблин С.Ю. Анализ точности индивидуального прогнозирования // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы междунар. науч.-практической конф. молодых ученых и специалистов (12-13 нояб. 2019 г.). Воронеж, 2019. С. 330-335.
4. Афоничев Д.Н., Курьянов В.К., Скрыпников А.В. Принципы оптимизации проектных решений автомобильных дорог с использованием программ моделирования дорожного движения // Математическое моделирование информационных и технологических систем: сб. ст. Воронеж, 2002. С. 108-110.

5. Белокуров В.П. Транспортная психология. Воронеж, 2016. 329 с.
6. Скрыпников А.В. Количественная оценка влияния характеристик компонентов ландшафта на сложность строительства лесовозных автомобильных дорог // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК: материалы междунар. науч.-практической конф. Воронеж, 2020. С. 244-251.
7. Скрыпников А.В. Выбор критерия принятия решений при управлении информационным обеспечением автомобильного транспорта // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 10. С. 476-478.
8. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Nikitin V.V., Denisenko V.V., Boltnev D.E. Theoretical background of road landscape zoning. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. 659 (1).
9. Zelikov V.A., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Tikhomirov P.V., Borovlev A.O. Structural models of road landscapes and microlandscapes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. «International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production», 2021. P. 012116.
10. Ryabova O.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Tikhomirov P.V. Studying a geographical environment for road design // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2021. № 1 (49). P. 66-78.
3. Logojda V.S., Tihomirov P.V., Nikitin V.V., Bukreev V.YU., Sablin S.YU. Analysis of the accuracy of individual forecasting // Innovacionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya APK: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. molodyh uchenyh i specialistov (12-13 noyab. 2019 g.). Voronezh, 2019. P. 330-335.
4. Afonichev D.N., Kur'yanov V.K., Skrypnikov A.V. Principles of optimizing design solutions for highways using traffic simulation programs // Matematicheskoe modelirovanie informacionnyh i tekhnologicheskikh sistem: sb. st. Voronezh, 2002. P. 108-110.
5. Belokurov V.P. Transport psychology. Voronezh, 2016. 329 p.
6. Skrypnikov A.V. Quantitative assessment of the influence of the characteristics of landscape components on the complexity of the construction of logging roads // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy dlya effektivnogo razvitiya APK: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. Voronezh, 2020. P. 244-251.
7. Skrypnikov A.V. The choice of decision-making criteria in the management of information support for automobile transport // Automation and modern technology. 2017. V. 71. № 10. P. 476-478.
8. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Nikitin V.V., Denisenko V.V., Boltnev D.E. Theoretical background of road landscape zoning. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. 659 (1).
9. Zelikov V.A., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Tikhomirov P.V., Borovlev A.O. Structural models of road landscapes and microlandscapes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. «International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production», 2021. P. 012116.
10. Ryabova O.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Tikhomirov P.V. Studying a geographical environment for road design // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2021. № 1 (49). P. 66-78.

References

1. Burmistrov D.V., Vysockaya I.A., Denisenko V.V., Bryuhoveckij A.N., Nikitin V.V. Algorithm for modeling the processes of organizing and planning the rhythmic construction of logging roads // Nauka i obrazovanie na sovremennom etape razvitiya: opyt, problemy i puti ih resheniya: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (24-25 noyab. 2020 g.). Voronezh, 2020. P. 295-298.
2. Mogutnov R.V., Bukreev V.YU., Tihomirov P.V., Slyusarev A.A., Bryuhoveckij A.N. Algorithm for the formation of technical specifications for the design of the machine // Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya tekhnologicheskikh processov v sel'skohozyajstvennom proizvodstve: materialy nac. nauch.-prakticheskoy konf. (25 sent. 2020 g.). Voronezh, 2020. P. 52-58.